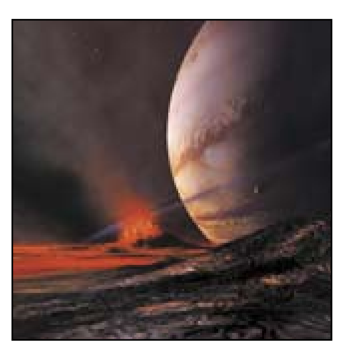
RAMIFICACION Y PODA EN EL ARBOL DE LA VIDA • SECUESTRO DEL DIOXIDO DE CARBONO





Abril de 2000 Número 283

SECCIONES



Portada: Space Channel/ Philip Saunders

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Julie Dorsey y Pat Hanrahan
8	Pat Hanrahan y Wolfgang Krueger
9	Julie Dorsey, Hans Pedersen y Pat Hanrahan
10	Julie Dorsey, Alan Edelman,Henrik Jensen, Justin Legakis y H. Pedersen
11	Marc Levoy, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz y Duane Fulk
12	Alfred T. Kamajian
13	Stephen Westin
16-17	Jared Schneidman Design (*Sonda Galileo*); NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro (*imágenes Io*)
18	Reta Beebe, Universidad del estado de Nuevo México y NASA (*arriba, izquierda*); Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA (*centro y abajo izquierda*); Don Dixon (*abajo, derecha*)
19	Don Davis (*cápsula*); Don Dixon (*arriba y centro*); Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA (*abajo, izquierda*), Alfred T. Kamajian (*abajo, derecha*)
20	Alfred T. Kamajian (*campos electromagnéticos*); Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA (*satélites de Galileo*)
21	Lab. de Propulsión a Chorro/NASA
22-23	Laboratorio de Propulsión a Chorro/ NASA; Don Davis (*derecha*)
24-25	Laboratorio de Propulsión a Chorro/ NASA; Don Davis (*derecha*)
26-27	Jana Brenning
28	Christoph Blumrich
29	C. Blumrich; fuente: David F. Spencer
30	Christoph Blumrich
31	Jana Brenning
44-45	Richard Hamilton Smith *Corbis*; Michael Goodman (*inserto*)
46	Cortesía de Bernard Hallet (*fotografía*); M. Goodman (*dibujo*)
47	Frank A. Cara (*fotografía*); Michael Goodman (*inserto*)
48-49	Justine Parsons
50	Terese Winslow
51	Johnny Johnson (*arriba*); Petit Format/Nestle/Science Source (*embrión*); cortesía de Susan L. Hyman (*abajo*)
52-53	Justine Parsons (*fotografías*); fuente de Diagnostic Categories: *Diagnostic and Statitical Manual of Mental Disorders* (*DSM-IV*)
54-55	Daniels & Daniels
56-57	G. Richard Harbison (*N. punctata*); Edith A. Widder (*Phronima* y *Cunina*)
58	Laurence P. Madin *WHO* (*Arctapodema*); G. Richard Harbison (*Pterosoma* y *Ctenophora*)
59	Edith A. Widder (*Cystosoma*); G. Richard Harbison (*Vitreledonella richardi*)
60	Edith A. Widder (*arriba*); G. Richard Harbison (*abajo*)
61	Nadav Shashar (*copépodos*)
62	Al Giddings Images Unlimited (*ilustración de fondo*); Laurence P. Madin (*izquierda*); Harbor Branch Oceanographic Institution (*derecha*)
64	Laurie Grace
65	David Fierstein
66-70	David Fierstein
71	Peter Arnold, Inc.
72	David Fierstein
75-82	Víctor Navarro Brotóns; cortesía del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, Países Bajos (*astrolabios* y *ballestilla*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Materiales digitales y envejecimiento virtual* y *Juegos matemáticos*; Mónica Murphy: *La cosecha de la Misión Galileo*; Jordi Barbé García: *Nuevo árbol de la vida*; Juan Pedro Campos: *Derretido bajo cero*; Esteban Santiago: *Autismo precoz*; Josep Maria Gili: *Animales transparentes*; Angel Garcimartín: *Perfiles* y *Nexos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

BOMBA DE HIDRÓGENO: AVISO. «Tenemos que pensar en cómo salvar a la humanidad de esta catástrofe final. Y romper con la costumbre, que parece haberse apoderado de este país, de considerar cada arma una mera máquina más y un medio lícito de ganar en nuestra pugna con la URSS. —Hans A. Bethe»

LA ECUACIÓN DE LA GRAVEDAD. «Dirá un escéptico: 'Podría ser perfectamente cierto que este sistema de ecuaciones fuera válido desde el punto de vista lógico. Pero ello no prueba que concuerde con la naturaleza.' Y tendrá razón. Sólo la experiencia puede decidir acerca de la verdad. Pero habremos logrado algo si conseguimos formular una ecuación significativa y exacta. La deducción, a partir de las premisas, de unas conclusiones que puedan confrontarse con la experiencia requerirá cuidadosos esfuerzos y probablemente nuevos métodos matemáticos. —Albert Einstein»



Otra aplicación del blindaje flexible: una locomotora en la guerra de los bóers

ESPÍA ATÓMICO. «El célebre caso de Klaus Fuchs, espía atómico, tuvo un fin precipitado la pasada semana. Fuchs, comunista alemán llegado a Inglaterra en 1933 y responsable de física teórica en el centro británico de investigación atómica de Harwell, se reconoció culpable de haber pasado secretos atómicos a agentes de la URSS. A Fuchs se le impuso la condena máxima de 14 años de prisión. Una rara circunstancia del caso es que la URSS rechazó la confesión de su espía.»

...cien años

PIONERO DE LA ANTÁRTIDA. «El vapor 'Cruz del Sur', con el noruego C. E. Borchgrevink y los supervivientes de la expedición al polo Sur equipada en 1898 por el editor británico Sir George Newnes, ha llegado a Wellington (Nueva Zelanda). Herr Borchgrevink da cuenta de la localización del polo magnético.» [*Nota de la Redacción: Carsten E. Borchgrevink condujo la primera expedición de invierno al continente antártico.*]

MARES SIN SOL. «Sir John Murray disertó ante la Sociedad Británica acerca de algunos hechos interesantes relativos a las grandes profundidades oceánicas. Los datos obtenidos hasta ahora muestran que a una profundidad de 180 metros la temperatura del agua permanece casi invariable a lo largo de las estaciones. Casi todas las aguas profundas del océano Indico se mantienen a menos de 1,7 ºC, pero en el Atlántico Norte y en casi todo el Pacífico la temperatura es mayor. Dado que las profundidades marinas son regiones oscuras impenetrables a la luz solar, no habrá vida vegetal en el 93 por ciento de los fondos.»

BLINDAJE FLEXIBLE. «El tren blindado ha representado un papel importante en la guerra de los bóers. Un memorable incidente fue el ataque al tren blindado en Chieveley donde cayó prisionero Winston Churchill. Como es sabido, las protecciones usuales son raíles y chapas de caldera, pero la locomotora de nuestro grabado recibió una protección especial. En defensa de la máquina de la línea de Colenso se emplearon mantos hechos de soga, de cuya confección se encargaron marineros. La protección se mostró magnífica. Es posible que la locomotora funcione sólo por señales de campana, con el fogonero y el maquinista totalmente resguardados. Presenta un aspecto grotesco, de caniche.»

ARPONEADA HACE MUCHO. «Se ha encontrado una ballena con un arpón en el cuerpo que, por las marcas que presenta, se lo debieron clavar hace al menos treinta y seis años.»

...ciento cincuenta años

NUEVO ARPÓN BALLENERO. «Debemos al capitán Robert Brown, de New London (Connecticut), un invento para mejorar la caza y captura de ballenas. Aunque siempre es peligroso y difícil el arponeo y alanceado de ballenas, con ciertos cetáceos del Pacífico resulta del todo impensable acercarse en bote. Se ha propuesto muchas veces la idea de disparar el arpón desde un cañón, pero el arpón del capitán Brown, unido a la cuerda, puede disparase con la precisión de una bala de mosquete. El invento podría calificarse como 'Caza de ballenas venturosa y fácil gracias a un capitán yanqui.'»

LA ERA DEL VAPOR. «Se dice que, según el último censo, en Inglaterra el número de caballos ha disminuido desde 1.000.000 a 200.000 durante los dos últimos años. Dicho de otro modo: el ferrocarril ha obligado a prescindir de 800.000 caballos; ni éstos ni los bueyes apenas se emplean ya para el tiro.”

Materiales digitales y enveje

Para crear por ordenador imágenes de mayor realismo, habrá que refinar los modelos sobre estructura física de los materiales y su degradación ambiental

Julie Dorsey y Pat Hanrahan

En 1995, el grafismo de animación computarizada marcó un hito en el mundo del cine con *Toy Story*, el primer largometraje de dibujos animados realizado sólo con medios informáticos. Sin restarle mérito, los personajes, los ambientes y los decorados de creación digital traslucían un aspecto peculiar, un algo que los alejaba del mundo real. En ellos, todo era un poco demasiado liso y perfecto, un poco limpio de más, como recién moldeados en plástico. Echamos en falta el polvo y la suciedad, las grietas y los arañazos; el hilillo herrumbroso que escurre pared abajo desde una cañería con fugas; la pátina verdusca y desigual de oxidación de la estatua de cobre; la faz castigada por el tiempo e incrustada de sal de una antigua esfinge de granito; los delicados matices de la piel humana, con sus pecas, poros, arrugas y el leve pálpito de la sangre caliente.

El equipo Pixar, que presentó *Toy Story 2* a finales de 1999, sí añadía efectos del envejecimiento, como las rozaduras o la suciedad, pintándolos sobre las superficies, pero se trata de un proceso "a la medida", que exige mucho tiempo. Ni la aplicación más intensiva de estas técnicas establecidas, ni el recurso a una mayor fuerza bruta computacional, bastarán para superar la apariencia caricaturesca, cérea, de los gráficos computarizados. Para producir una simulación que no dé impresión de serlo, hemos de modelizar la apariencia de los materiales en toda su variedad, sin olvidar la mugre y el deterioro. Ciertas técnicas, como el seguimiento de rayos y la radiosidad, que simulan la iluminación, pueden aportar, al ambiente de las escenas virtuales, los reflejos y las penumbras entre otros efectos. Mas la exactitud y la complejidad visual de las imágenes resultantes dependen también, crucialmente, de la calidad de los modelos del material subyacente.

Tales modelos están adquiriendo cada vez mayor realismo. Una de sus características importantes reside en la modelización explícita de la estructura interna de cada material y la simulación de la propagación y dispersión de la luz bajo su superficie. Otra es la forma en que modelizan la evolución de las superficies en fenómenos que las envejecen, como la corrosión, que puede originar capas irregulares de óxidos y, también, desprender fragmentos de la superficie. Una apasionante posibilidad para el futuro consistirá, quizás, en una paleta de herramientas de programación que permita a los artistas "plasmar" procesos de esta natura-

cimiento virtual



1. DESARROLLO DE UNA PATINA sobre un Buda de cobre. Se ha simulado representando la estructura física de la superficie mediante una serie de capas. Diferentes operaciones oxidan la capa externa y eliminan material suelto, como si la estatua se hallara expuesta a la acción del viento y la lluvia. La interacción entre la luz y la pila de capa determina la apariencia resultante.



2. LA PIEL humana se cuenta entre los rasgos más difíciles de simular. Esta imagen modeliza la interacción de la luz con la epidermis, externa, y la dermis, subyacente y ricamente vascularizada. Los labios, por ejemplo, son sonrosados debido a la finura de su epidermis. Los datos correspondientes a esta imagen se obtuvieron mediante un barrido clínico de resonancia magnética.

leza, de igual manera que hoy pueden aplicar "pintura" y otros efectos de coloreado en la pantalla.

La aplicación de esa técnica de síntesis de imágenes ("rendering") se está difundiendo en la industria. No sólo en películas de dibujos animados. En el diseño de su avión 777, Boeing ha utilizado la técnica de síntesis para sistemas de realidad virtual. Los estudios de arquitectura y los urbanistas se sirven de la misma para estimar el impacto visual de las edificaciones propuestas sobre el vecindario.

Seguimiento de rayos, reflexión y textura

Científicos y artistas han especulado largo y tendido sobre las causas del aspecto que ofrecen las cosas en el mundo natural. A lo largo del siglo XVII, Rembrandt y otros pintores de las escuelas holandesa o flamenca aplicaban, para reproducir con veracidad los matices de la piel, varias capas de pintura y laca. En el siglo XIX, Lord Rayleigh recurrió a principios de la física para explicar el color azul del cielo, la iridiscencia de las alas de las mariposas y el brillo de las superficies pulimentadas. En nuestros días, podemos servirnos de tales teorías e ideas para crear simulaciones computarizadas de los mecanismos responsables de las diferencias de aspecto externo.

La obtención de imágenes computarizadas realistas exige la simulación de la luz y de su interacción con el medio en el cual se hallan objetos (por ejemplo, escenarios, decorados y personajes), luces que los iluminan y una cámara virtual que toma la escena. Los objetos están definidos por sus formas, posiciones, orientaciones y materiales. Elaborado un modelo computarizado de la escena, el programa de síntesis realista de imágenes computa las trayectorias que sigue la luz desde su origen hasta la cámara.

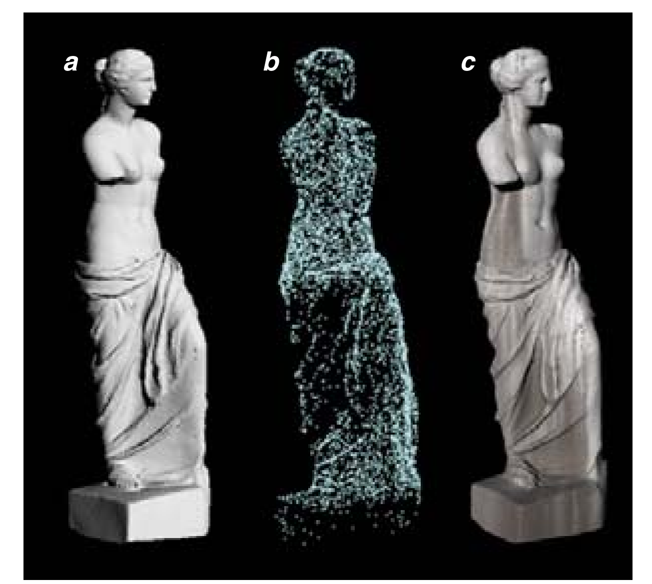
Varias son las técnicas utilizables para simular la propagación de la luz. En el método de radiosidad se modeliza la forma en que la luz reflejada desde una superficie mate ilumina el área circundante. En el seguimiento de rayos se va rastreando la trayectoria lumínica en cada una de sus reflexiones. La técnica más perfecta disponible es la de seguimiento estocástico: los rayos que inciden en una superficie se reflejan al azar en distintas direcciones con una distribución de probabilidad que depende de las propiedades de la superficie o de otras partes del entorno. Esta técnica permite simular de modo fiable la interacción de la luz con una gran variedad de materiales y formas complejas.

La metodología básica de la síntesis realista de imágenes ("rendering") se desarrolló en unos pocos años, mediados los setenta, en la Universidad de Utah. Los primeros modelos de sombreado, híbridos, combinaban simulaciones de la iluminación, interpolación y modelos de reflexión. Las formas de los objetos solían ser aproximadas mediante reticulados triangulares. En el método ideado por Henri Gouraud se iluminaba el vértice de cada triángulo; el color de la luz reflejada se interpolaba a través del triángulo. Debemos a Lance Williams y Edwin Catmull (futuro cofundador de Pixar) el método de aplicación de texturas; en él, se controla el color de un objeto por una imagen "cartografiada" sobre la superficie del objeto, más o menos, como se deposita una calcografía sobre un juguete de plástico.

En el grafismo computarizado, los primeros modelos de la reflexión de la luz en objetos trataron de encerrar en fórmulas sencillas los principales aspectos que determinan su apariencia, sin recurrir a principios físicos para simular la interacción entre luz y materia. Estos modelos fenomenológicos de la reflexión —así se les llamó— utilizaban una función matemática de distribución de reflectancia bidireccional, FDRB. Las distribuciones de reflectancia van desde las correspondientes a materiales mates, como el cartón, que dispersan la luz por igual en todas las direcciones (ley de reflexión de Lambert), hasta las de los espejos perfectos, que reflejan cada rayo en una sola dirección. Entre estos dos extremos, las superficies brillantes generan una distribución de luz reflejada que se centra más o menos en una dirección. Para la modelización de tales superficies, se acostumbra ajustar el tamaño de los puntos más brillantes de luz reflejada.

En los gráficos computarizados, se considera que la textura y la reflexión constituyen, para la apariencia de los objetos, aspectos independientes. De hecho, en la mayoría de los materiales, la textura visual es más peculiar y distintiva que la reflectancia, por lo que la generación y uso de texturas para controlar la reflectancia en distintos puntos de la superficie suponen una capacidad importante. Dos son las técnicas habituales

JULIE DORSEY y PAT HANRAHAN han venido colaborando en la representación digital de materiales desde 1994. Dorsey, docente de los departamentos de arquitectura y de ingeniería eléctrica, trabaja en el laboratorio de ciencias de cómputo del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Hanrahan regenta la cátedra Canon USA del departamento de ciencias de cómputo de la Universidad de Stanford.









3. LOS EFECTOS DE LA LLUVIA y la suciedad sobre una reproducción de la Venus de Milo (*arriba, a*) fueron simulados utilizando un modelo de las gotas individuales (*b*) para producir una estatua con venas de suciedad escurrida (*c*). Un proceso similar sirvió para simular los efectos de la lluvia que caía sobre la fachada de un edificio (*derecha*).

para crear combinaciones de textura y reflexión: los modelos procedimentales, basados en el sombreado, y el pintado tridimensional directo. Estas dos metodologías señalan los extremos opuestos del espectro, altamente programado el uno, y altamente interactivo el otro.

En un modelo procedimental, la generación del motivo deseado se realiza mediante un programa. Por ejemplo, el veteado de la madera puede definirse mediante un algoritmo que cree una textura maciza, compuesta por anillos concéntricos, en tres dimensiones. El motivo anular controla entonces el color y la intensidad de la luz reflejada desde piezas talladas a partir de esa madera; por ejemplo, las patas de las mesas.

En el otro extremo, el de pintado tridimensional, el artista aplica simulación de pintura sobre una forma tridimensional. Las propiedades de la pintura determinan el aspecto del material; los motivos (por ejemplo, el veteado) se plasman aplicando distintas pinceladas en diferentes partes del objeto. Dado que la metáfora del pintado tridimensional les resulta intuitiva y natural a los pintores, y habida cuenta de que tales sistemas proporcionan al usuario realimentación inmediata, pues reflejan al momento las modificaciones, no debe extrañarnos su empleo en la industria del espectáculo.

A pesar de la gran potencia de estas metodologías, son varias las limitaciones que padecen. En primer lugar, suelen ser tediosas y exigen mucho trabajo. Imaginemos que hubiera que simular molduras complejas de piedra en un edificio. Está claro que las técnicas algorítmicas podrían resultar útiles a tal fin. En segundo lugar, conforme vayan introduciéndose las técnicas digitales, se hará precisa la simulación de un repertorio de apariencias creciente. Las técnicas particulares, a la medida, aunque funcionan bastante bien para objetos y aplicaciones específicos, llegarán pronto a sus límites. El deseo de trascender tales límites ha servido de acicate para una nueva tendencia en las técnicas de síntesis: la inclusión de más información sobre la estructura del material y sobre la interacción de la luz con la materia.

Aspereza y rugosidad

Tenemos en las superficies ásperas o rugosas ejemplos en los que la estructura material afecta al aspecto externo. Las superficies de metales bruñidos o mecanizados suelen presentar microsurcos. En los tejidos las fibras entrecruzadas (la urdimbre y la trama) crean valles y resaltes. Las características de una superficie pueden también variar con el tiempo; por ejemplo, al pulimentar una superficie se eliminan prominencias y gana brillo.

Podemos esbozar un modelo de la microgeometría de una superficie rugosa o áspera mediante un campo de alturas que perturba en una pequeña magnitud la posición de la superficie en cada punto. Estos desplazamientos vendrán dados por una función aleatoria con propiedades estadísticas especificadas o tal vez por un mapa detallado de las estructuras microscópicas de la superficie.

La reflexión en superficies rugosas fue ya estudiada por Pierre Bouguer, en tiempos de la Ilustración. Bouguer supuso que la superficie constaba de muchísimas "microfacetas" (a las que llamó "micro faces"). La cantidad de luz reflejada hacia un observador estaba determinada por la proporción de microfacetas que se hallaban orientadas para reflejar luz directamente desde la fuente hacia el observador. Bouguer esperaba poder explicar la ley de Lambert, que describe la apariencia de las superficies



4. DETERIORO POR LA INTEMPERIE de una esfinge de granito, simulado mediante una corteza tridimensional (*inserto*) que se extiende desde la superficie pétrea hacia el interior. El agua y los contaminantes la invaden, induciendo alteraciones químicas y provocando la degradación de minerales, la recristalización de sales y la erosión de la corteza.

mates, construyendo una disposición de microfacetas capaz de reflejar por igual la luz en todas las direcciones, pero al cabo se demostró que ello era imposible.

No obstante, en el caso de superficies especulares o satinadas, el modelo de microfacetas se ha convertido en el más socorrido. Las simulaciones computarizadas de la reflexión pueden especificar directamente la distribución de alineaciones de microfacetas. Lo habitual es utilizar una sola distribución, juntamente con un parámetro de rugosidad que define cuánto se desvían las microfacetas de la forma principal de la superficie.

Las distribuciones de microfacetas tienen sus propias limitaciones, incluso para superficies satinadas. Por ejemplo, cuando la luz incide en un ángulo rasante sobre una superficie áspera, los picos altos proyectan su sombra sobre los valles, modificando enormemente la apariencia de la superficie. Por desdicha, la computación de tales efectos de "autosombreado" para distribuciones de microfacetas resulta harto dificultosa. Y el asunto se complica si la longitud de onda de la luz es comparable al tamaño de las ondulaciones de la superficie; en tales casos deja de servir el sencillo modelo de Bouguer, pues intervienen efectos ondulatorios, como la difracción y la interferencia.

Más profundo que la piel

Sorprendentemente, en muchos materiales, el proceso físico de reflexión no resulta de la interacción de la luz con la superficie propiamente dicha, es decir, con la interfase infinitesimal entre el aire y el medio. Se producen, en cambio, interacciones dentro del material. Este fenómeno de dispersión subsuperficial se da a menudo en materiales orgánicos, en los plásticos y en otros materiales compuestos. La profundidad relevante puede variar desde micras, en el caso de pinturas y otros recubrimientos, hasta milímetros, como en el caso de la piel o el mármol.

En la reflexión subsuperficial, la luz atraviesa la interfase y penetra en el material. En el interior, la luz es dispersada y absorbida por los constituyentes del medio, como sus átomos o moléculas individuales, de forma similar a la interacción entre la luz y una neblina de vapor de agua. La luz dispersada puede viajar de regreso hasta la superficie y salir del medio, presentándose al observador en forma de luz reflejada. La mayoría de los fenómenos de dispersión en el medio son, por así decirlo, golpes oblicuos, que desvían la luz menos de 90 grados, pudiendo ser necesarias muchas de tales colisiones para reencaminar la luz hacia el exterior. Cuantas más desviaciones, más aleatorias las direcciones de propagación de la luz. Se cree que este proceso, que predice que la luz puede salir del material en una dirección cualquiera, es el que origina la ley de Lambert.

En un principio, la teoría de dispersión en medios estratificados se esbozó para explicar el transporte radiativo —el movimiento del calor y la luz por radiación— en las atmósferas planetaria o solar. La teoría ha sido ulteriormente desarrollada por investigadores interesados en la apariencia de la pintura, la piel, la vegetación y el mar. En fecha reciente, se han adaptado esos modelos al grafismo computarizado. Vale la pena señalar que tanto una pared pintada y limpia, como los delicados matices de la piel del rostro de una persona, que se cuentan, respectivamente, entre las apariencias más sencillas y más difíciles de modelizar, quedan adecuadamente descritas por la dispersión subsuperficial.

Para preparar la mezcla se empieza por la pintura blanca. La blancura de la pintura se debe al óxido de titanio, un dispersante casi perfecto que prácticamente no absorbe luz. Cuando la luz incide sobre una superficie pintada de blanco mate, la luz penetra en la capa de pintura; dispersada muchas veces por las partículas de óxido de titanio en suspensión, acaba por salir de la pintura y retornar al ambiente. La blancura de la luz se debe a que es muy poca la luz absorbida, y todas las longitudes de onda del espectro visible son devueltas por igual. La dispersión múltiple en el interior de la pintura y la consiguiente aleatorización de la dirección de la luz explica la apariencia mate.

Para preparar pintura de color, se agrega a la pintura blanca un poco de pigmento y se mezcla bien. Estos pigmentos son compuestos químicos que absorben selectivamente ciertas longitudes de onda. Dado que las partículas de pigmento se encuentran suspendidas en un medio difusor casi perfecto, la luz acaba interactuando con una partícula de pigmento y es parcialmente absorbida; la luz saliente toma el color

Modelizado de la reflexión

Nos valemos de la función de distribución de reflectancia bidireccional (FDRB) para describir la reflexión de la luz en una superficie. Esta función matemática especifica el porcentaje de luz que, procedente desde cada posible dirección de incidencia, se refleja en cada dirección hacia el exterior.

El modelo de reflexión más antiguo es la ley de reflexión, conocida por los griegos, que afirma que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. Para una dirección de incidencia dada, la ley se describe por una FDRB que es nula en todas las direcciones, salvo en la única dirección de salida, por donde cursa toda la luz.

Otro modelo de reflexión es la ley de Lambert, que afirma que la luz se refleja por igual en todas las direcciones, independientemente de la dirección de incidencia. La ley de Lambert constituye un buen ejemplo de modelo fenomenológico, pues capta la apariencia de materiales mates, como el cartón, sin describir mecanismos físicos causantes de que la luz se disperse por igual en todas las direcciones. De hecho, la explicación de la ley de Lambert a partir de principios físicos ha constituido un reto para la investigación. Entre los casos extremos —espejos y superficies mates— se encuentran las superficies brillantes, cuya función de reflectancia presenta una distribución centrada aproximadamente en una dirección.



Medición de la reflectancia de un objeto

Ingenieros ópticos y expertos en radar han medido, año tras año, las funciones de reflectancia de los materiales, tarea que compartieron con los interesados en las propiedades de materiales exóticos. Tales mediciones resultaron provechosas en el diseño de aviones "invisibles". Las funciones de reflectancia también presentan interés para el estudio de la superficie de la Tierra desde satélites: la apariencia de los bosques, los cultivos y demás varía en función del ángulo de la luz solar y del ángulo de visión del satélite. Es el problema inverso de la simulación del aspecto de un material, es decir, la deducción del material basada en su apariencia.

Se expone a la izquierda un instrumento, construido en la Universidad de Stanford y diseñado para medir funciones de reflectancia. En el centro del mismo se coloca una pequeña muestra, iluminada por una fuente de luz; un fotómetro va sistemáticamente desplazándose a distintas posiciones del hemisferio, midiendo la luz reflejada en cada una de esas direcciones. Las mediciones se repiten desplazando la fuente de luz en todas las posiciones del hemisferio, hasta determinar la función de reflectancia del material. Las funciones de reflectancia así determinadas no tienen todavía una amplia aceptación en el grafismo informático, pero varios grupos siguen ese enfoque.

—J. D. y P. H.

de las longitudes de onda no absorbidas. Un modelo de este proceso fue introducido por P. Kubelka y F. Munk en 1931. Supusieron que el medio contenía partículas que dispersaban y absorbían luz por igual en todas direcciones; dedujeron el color y la intensidad de la luz que retornaba desde el medio en función de su espesor y de las concentraciones de partículas del pigmento. Podemos apelar a su modelo para simular los cambios de color causados por la variación del espesor de la capa de pintura o al mezclar varios pigmentos a la vez. Mostraron también el modo de calcular los efectos de múltiples capas de pintura, cada una con diferente color o composición.

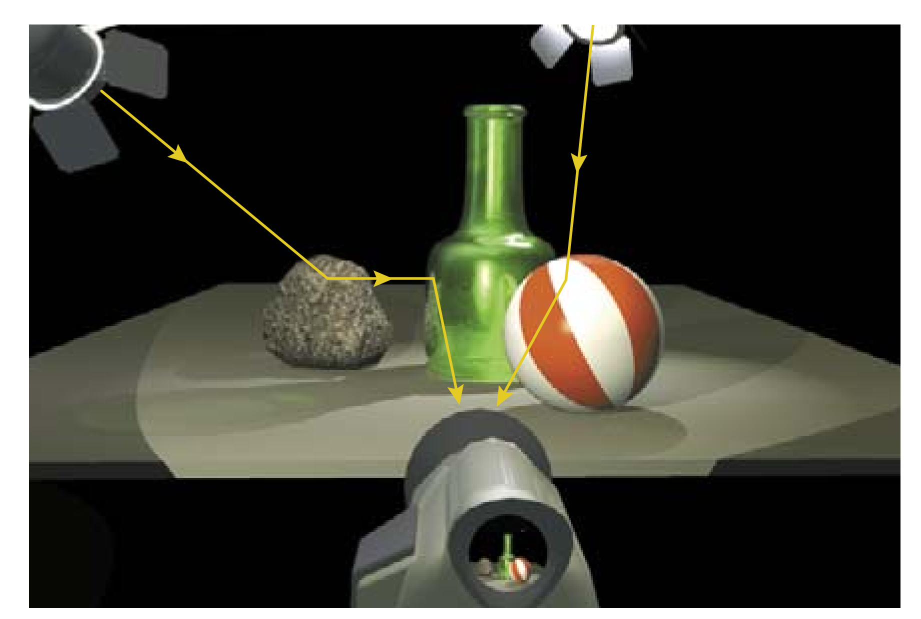
El modelo Kubelka-Munk es el más sencillo y el más utilizado para la reflexión subsuperficial. Pero, dado que supone que las partículas dispersan la luz por igual en todas las direcciones, sólo funciona bien con materiales mates. La reflexión subsuperficial puede también distribuir la luz en direcciones privilegiadas, como ocurre en las superficies satinadas; se han ideado modelos para dar cuenta de estos efectos. Se trata, en tales modelos, de permitir la dispersión direccional inducida por las partículas. Para aproximar la luz retornante se la divide en dos partes: luz que emana del material tras un único suceso de desviación nítida y luz remanente en el interior, dispersada muchas veces. Lo mismo que en el modelo Kubelka-Munk, se supone que la luz polidispersada obedece a la ley de Lambert, mientras que la luz proveniente de sucesos de monodispersión se distribuye de acuerdo con la función de dispersión de la partícula de que se trate.

Hemos aplicado las ideas anteriores a la modelización de la apariencia de la piel, desde hace mucho un material clave que los sistemas de grafismo informático se han esforzado en simular, sin demasiado éxito. Radica la dificultad, por un lado, en su estructura complicada y, por otro, en nuestro sistema visual, finamente ajustado a la percepción de rostros. La dispersión subsuperficial emanada desde múltiples capas resulta eficaz para afrontar esos problemas.

La piel humana consta de dermis, o capa interna, y epidermis, o capa externa. La dermis es rica en sangre, que le confiere color rojo. La epidermis, más delgada, contiene melanina. Al aumentar la concentración de melanina, la piel se torna bronceada o negra. La epidermis, además, puede estar cubierta de aceites, suciedad o cosméticos.

Para generar imágenes realistas de rostros, podemos controlar las concentraciones simuladas de sangre y de melanina y, también, los espesores relativos de la dermis y la epidermis. Así, por ser muy fina la epidermis de los labios, su aspecto es más rojo que el resto del rostro. Las pecas son modelizadas con manchones de melanina adicional distribuidos al azar por las mejillas.

Los primeros modelos de grafismo computarizado estaban idealizados. Daban por supuesto que los materiales se hallaban en su condición prístina. Pero todos los materiales sufren la erosión y el desgaste del entorno.



5. PARA LA SINTESIS DE IMAGENES realistas por ordenador es necesario simular la interacción entre luz y entorno. El ambiente contiene fuentes de luz, objetos y cámaras que observan la escena. La simulación ha de tratar adecuadamente las superficies brillantes y las mates, así como las texturas visuales.

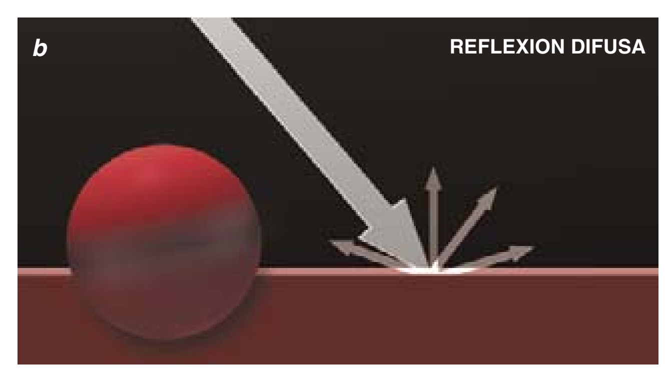
Algunas de las apariencias más ricas en matices —las paredes de ladrillo añejo, el metal herrumbroso, la piedra cubierta de musgo o la madera curada— son fruto de procesos físico-químicos (corrosión, erosión y sedimentación) o el crecimiento biológico. La susceptibilidad de un material al deterioro por la intemperie guarda una relación estrecha con su estructura. La piedra, la madera y los metales envejecen de muy distinto modo, debido a sus diferentes estructuras. También intervienen los métodos de preparación, como la cantería, la pulimentación o el teñido. Hemos iniciado el diseño de modelos para algunos de estos procesos que afectan a la apariencia externa, identificando primero los fenómenos físicos básicos subyacentes a un cambio específico de apariencia y, luego, confeccionando los modelos computarizados idóneos.

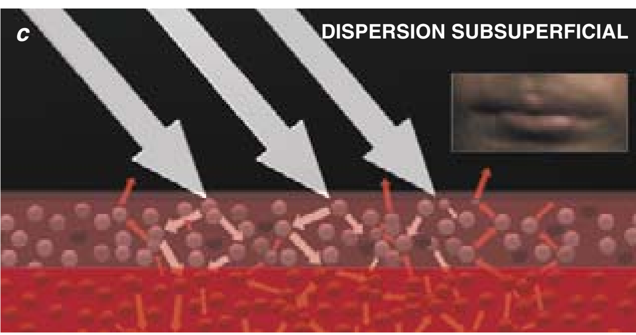
Simulación de la corrosión

Las pátinas metálicas constituyen un caso clásico de apariencias resultantes de la interacción entre material y entorno. Una pátina es una película o incrustación que se forma sobre una superficie por alteración química o por la adición o pérdida de material. Puede desarrollarse de forma natural, por corrosión atmosférica, o artificialmente, por pintado u otros procesos artificiales. La composición y tasa de desarrollo de la pátina depende del ambiente circundante. Aparece antes en medios urbanos que en zonas rurales, porque el aire de la ciudad tiene una mayor concentración de azufre. También las precipitaciones y otros elementos desempeñan un papel importante en la formación de pátinas.

Hemos desarrollado un modelo fenomenológico para la formación de pátinas de cobre. Representamos la superficie mediante una serie de capas; las pátinas se forman aplicando a la estructura estratificada una colección de operadores intuitivos, como “cubrir”, “erosionar” y “pulir”. Al “cubrir” una región se aporta óxido a la capa más externa. Al “erosionar”, se remeda el desprendimiento de material suelto por efecto del viento o la lluvia. Para simular con detalle las variaciones de espesor en el transcurso del tiempo, hemos experimentado con una serie de modelos de la estructura estratificada, donde la pátina crece a través de la superficie siguiendo un patrón fractal. (Los fractales han constituido un recurso habitual en grafismo computarizado para la síntesis realista de terreno, vegetación y objetos similares.) La apariencia final de la pátina de cobre depende del modo en que la luz interactúe con la serie estratificada; para ello nos valemos del modelo Kubelka-Munk.

El agua de lluvia es una de las fuerzas naturales de mayor importancia y penetración que contribuyen al deterioro de los materiales. Al escurrir produce patrones característicos. El agua puede limpiar ciertas partes,





6. LA REFLEXION DE LAS SUPERFICIES constituye un elemento crucial en los sistemas de síntesis de imagen (“rendering”). La reflexión especular (*a*) produce superficies brillantes con reflejos. Los materiales mate sencillos, como el cartón, pueden ser modelizados mediante reflexión difusa (*b*) que dispersan la luz por igual en todas las direcciones. En muchos materiales, las interacciones en subsuperficie (*c*) desempeñan un importante papel para generar su apariencia.

arrastrando la suciedad, y manchar en cambio otras, depositando suciedad y otras sustancias. Para simular estos procesos hemos desarrollado un modelo sencillo del flujo del agua, basado en "partículas".

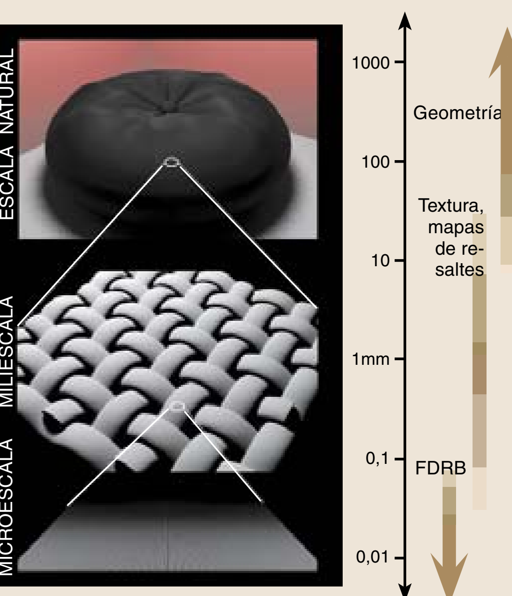
Cada partícula representa una gota de agua. El movimiento de cada partícula está controlado por la gravedad, el rozamiento, el viento, la rugosidad y por restricciones que mantienen a las partículas en contacto con la superficie. La interacción química entre el agua y los materiales de la superficie viene gobernada por un sistema de ecuaciones, que describen la tasa de absorción de agua por la superficie y la tasa de solubilidad y sedimentación de depósitos sobre la superficie.

Hemos aplicado el modelo a la simulación de las escorrentías y los lavados que tienen lugar sobre una reproducción de la clásica Venus de Milo, entre otros. Empezamos con un recubrimiento uniforme de suciedad sobre la estatua y después ejecutamos una simulación de la escorrentía, para lavar la superficie. El agua, al fluir, produjo churretes sobre los motivos de suciedad, y lo hizo de forma errática a tenor de las partículas. La suciedad se acumuló allí donde la superficie estaba protegida del curso del flujo, bajo los brazos por ejemplo. La distribución de suciedad obedeció a los pliegues de la túnica; así, las superficies superiores de las partes convexas de los pliegues se limpiaban, ensuciándose las superficies inferiores. La pauta ofrecía mayor uniformidad en la base de la estatua, por la sencilla razón de que a esa zona llegó menos cantidad de agua.

Tanto las pátinas de cobre como el modelo "de partículas" del flujo de agua simulan sólo efectos superficiales; es decir, los cambios de aspecto afectan en exclusividad a una fina película próxima a la superficie. Hemos empezado a investigar modelos y procesos de naturaleza más volumétrica, como la erosión de la piedra. Se forma ésta por uno o varios materiales entrecruzados entre sí, de los que resulta una suerte de tejido rígido. La disposición de tal tejido caracteriza el tipo de piedra y determina en parte sus propiedades físicas y químicas, entre ellas, su resistencia, color y durabilidad.

Grados de detalle

Los sistemas de grafismo computarizado han de habérselas con escenas que contienen millones de formas geométricas básicas. A menudo, para construir una sola imagen, deben realizar millones de cálculos con múltiples funciones de reflectancia. Por consiguiente, al utilizar modelos materiales en las aplicaciones se requiere suma destreza para hacer mínimo el número de cómputos. Ello puede ser tan sencillo como computar o aproximar funciones de reflectancia durante un proceso preparatorio y guardar los resultados para consultarlos rápidamente durante el proceso de síntesis realista de imágenes.



El modelo óptimo de una superficie, un cojín en este caso, depende del grado de detalle requerido.

Otra técnica clave consiste en introducir una jerarquía de abstracciones y utilizar la más idónea en el momento adecuado. Si la cámara se ha aproximado para tomar un primerísimo plano de un objeto, los detalles finos de la superficie han de ser visibles y explícitamente modelizados. Pero conforme la cámara retrocede y cambia la escala, los detalles más finos dejan de ser distinguibles, y pueden sustituirse por aproximaciones más sencillas. En ese sentido, una superficie áspera puede quedar modelizada en un campo de alturas y, en las tomas muy próximas, estas irregularidades pueden ser presentadas como desplazamientos geométricos visibles, que ofrecen las prominencias y recovecos de la superficie con detalle fino. En tomas a media distancia puede que sólo sea resoluble la forma suave promedio de la superficie; la rugosidad puede quedar plasmada en sutiles modificaciones de las sombras juntamente, tal vez, con algunos parches de autosombreado. En las tomas a distancia, podría bastar una distribución de microfacetas.

El cambio automático de la representación y la computación de propiedades materiales al aproximar o alejar la cámara constituye un difícil problema que ofrece máximo interés. ¿Cómo podemos producir un programa informático que conmute automáticamente al nivel apropiado de detalle? Las escenas de las aplicaciones actuales, de extrema complejidad, suelen contener decenas de millones de superficies, por lo que, por eficiencia computacional, resulta crucial utilizar la más sencilla aproximación posible para cada elemento.

—J.D. y P.H.

Piedras de la Antigüedad

Igual que los metales, la piedra expuesta a la intemperie sufre el ataque de los contaminantes atmosféricos. De éstos, los óxidos de carbono, azufre y nitrógeno forman, en disolución acuosa, la temible lluvia ácida. En vez de quedar confinada a la superficie, esa disolución se infiltra en la piedra. La porción de piedra infiltrada puede experimentar cambios químicos, capaces, por recristalización, de producir una costra, típicamente más frágil que la estructura nativa de la piedra. Con el tiempo se desprenden fragmentos de la costra, dejando al descubierto piedra limpia, expuesta a ulterior ataque. Así pues, entre los efectos netos de la exposición de la piedra a la intemperie se cuentan alteraciones del color, la formación de costras de suciedad, la erosión de las superficies y daños estructurales, como el agrietamiento.

Para nuestra simulación nos guiamos por una pequeña esfinge de granito expuesta a dichos procesos. Hemos modelizado la estatua mediante una "cáscara" de piedra que se adentra en el interior. Una función tridimensional describe cuáles son los minerales presentes en toda la

estructura pétrea de esta “superficie volumétrica”. En el modelo ambiental se han introducido fuentes de agua y contaminantes, que inducen reacciones sobre la superficie y en el interior de la cápsula. De este modo, el modelo genera una complicada microgeometría superficial y una intrincada mezcla volumétrica de minerales. Para plasmar la translucidez y la coloración causada por los minerales cercanos a la superficie, hemos simulado la dispersión de la luz dentro de la piedra por seguimiento estocástico de rayos.

Un problema difícil, común en el grafismo computarizado, estriba en lograr evitar la ejecución de un número excesivo de cálculos sin poner en entredicho la calidad de la imagen. En las escenas donde aparezca una estatua corroída en el fondo de la imagen, puede resultar apropiado sustituir los mapas de prominencias (que simulan pequeñas irregularidades geométricas de la superficie) por una distribución de microfacetas, que producen la textura idónea con un gasto computacional mucho menor. No obstante, al desplazar el punto de vista de la cámara e ir pasando la estatua hacia el primer plano resulta esencial un mapa detallado de la superficie para lograr un efecto realista.

Problemas difíciles

El desarrollo de modelos materiales para el grafismo computarizado apenas acaba de empezar, pero ha suscitado ya algunas cuestiones clave sobre las limitaciones de los modelos y las componendas necesarias. Son muchos los aspectos de la apariencia externa que no han recibido todavía una explicación física satisfactoria. La corrosión de los metales, por ejemplo, posee tremendo interés científico y evidente importancia práctica, pero la comprensión científica del problema dista de ser completa. Además, la variedad de aplicaciones que utilizan las técnicas de síntesis realista de imagen impone diferentes exigencias sobre la exactitud de los modelos. Por ejemplo, para la producción cinematográfica, basta que las apariencias ofrezcan el aspecto correcto; la exactitud física es de importancia secundaria. Sin embargo, en algunas aplicaciones científicas o de ingeniería, la exactitud física resulta determinante, lo que crea un conjunto distinto de expectativas para los modelos subyacentes. Podemos observar esta transacción en el modelo de la piel: aunque es lo bastante convincente para muchas aplicaciones, no incluye los folículos pilosos, las glándulas sebáceas y los poros, elementos que probablemente tendrían interés para biólogos o dermatólogos.

En el ámbito del grafismo computarizado, la creación de modelos de base física para materiales que pueden experimentar variaciones con el tiempo constituye un problema central. Hay que aumentar el repertorio de modelos de materiales y de procesos que afectan a su apariencia. En teoría, los informáticos podrían crear amplias taxonomías de materiales accesibles para un abanico de usuarios. Conforme vaya progresando nuestro conocimiento de la estructura de los materiales y se elaboren nuevos modelos computarizados, iremos recogiendo los beneficios de una pléyade de aplicaciones nuevas en diseño e ingeniería. Los proyectistas de automóviles podrían estudiar diversas pinturas aplicadas a coches virtuales para comprender la estructura, la apariencia y el rendimiento, a lo largo del tiempo, de las manos aplicadas. Los arquitectos y los conservadores del patrimonio artístico podrían simular la durabilidad a largo plazo de materiales y estudiar las distintas formas de preservarlos. Por último, los modelos computarizados de los materiales podrían ayudar a los diseñadores a crear formas inéditas, para embellecer el mundo, y no sólo imitarlo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REFLECTION FROM LAYERED SURFACES DUE TO SUBSURFACE SCATTERING. Pat Hanrahan y Wolfgang Krueger en *Proceedings of SIGGRAPH 93*. ACM, 1993.

MODELING AND RENDERING OF METALLIC PATINAS. Julie Dorsey y Pat Hanrahan en *Proceedings of SIGGRAPH 96*. ACM, 1996.

TEXTURING AND MODELING. Segunda edición. Compilado por D. S. Ebert et al. Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

MODELING AND RENDERING OF WEATHERED STONE. Julie Dorsey, Alan Edelman, Henrik Jensen, Justin Legakis y Hans Pedersen en *Proceedings of SIGGRAPH 99*. ACM, 1999.

Puede hallarse más información e imágenes en la WEB, en http://graphics.lcs.mit.edu/materials/

La cosecha de la misión *Galileo*

Acosada por los tropiezos técnicos, muy pocos eran los que creían que la nave espacial Galileo llevase a término su inspección exhaustiva de Júpiter y sus satélites. Ni nadie imaginaba que iba a encontrarse con un sistema tan heterogéneo

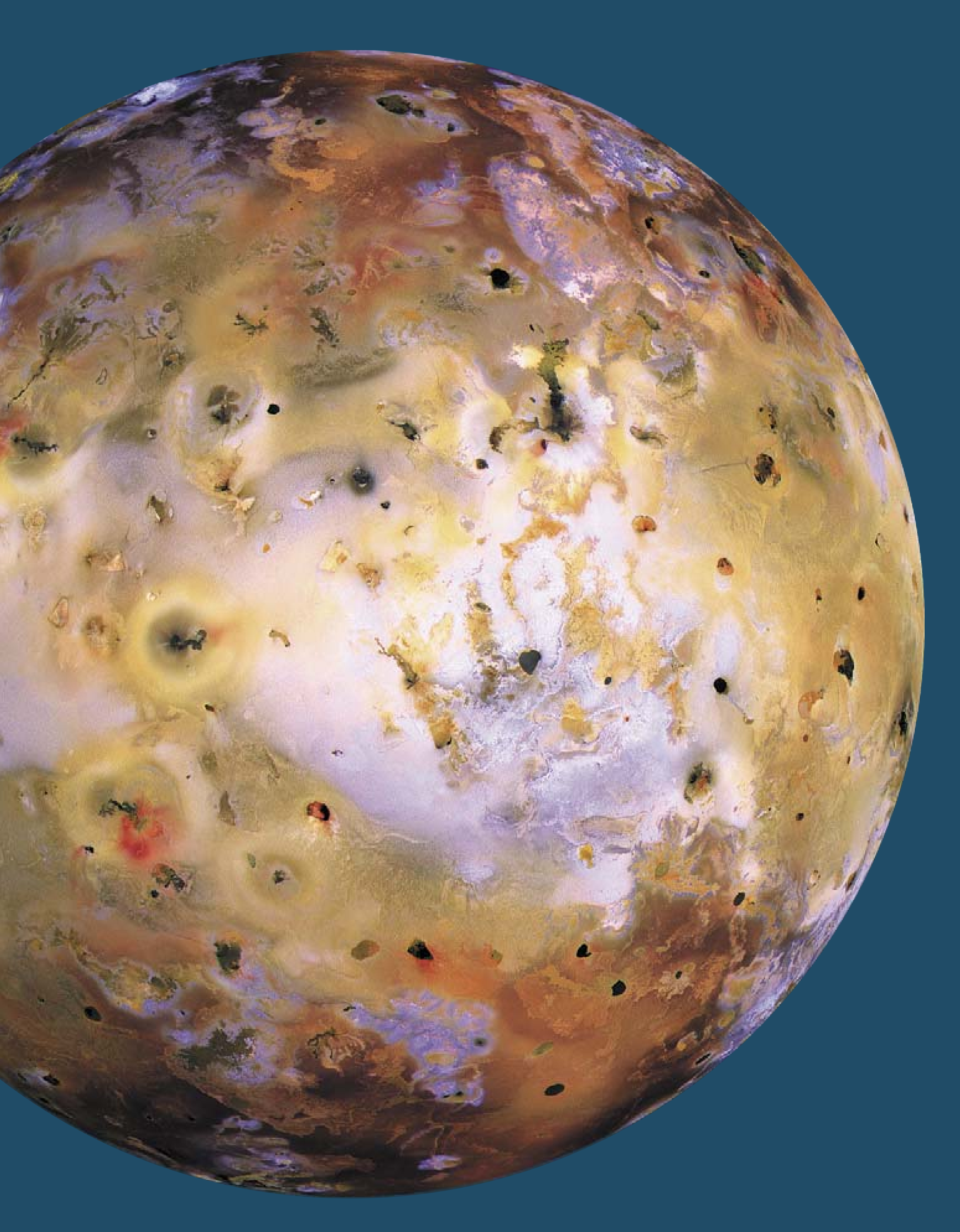
Torrence V. Johnson

Para ahorrar energía, la sonda viajaba sin emitir señales de radio. Sólo un reloj contaba los segundos. A 215.000 kilómetros por encima de la misma, la nave compañera se hallaba lista para recibir sus transmisiones. En la Tierra, ingenieros y científicos, muchos de ellos con veinte años casi de dedicación al proyecto, esperaban, tensos, las dos señales clave. La primera era un bit de datos, un sí o un no; ese guiño habría de revelarnos si la sonda lograba sobrevivir al descenso en llamas por la atmósfera imponente de Júpiter.

Llegar hasta allí no había sido fácil. Cuando se concibió la misión *Galileo*, a mediados de los setenta, se suponía que la nave espacial no tripulada, compuesta de sonda y vehículo orbital, partiría al espacio en 1982. El transbordador llevaría a *Galileo* hasta una órbita terrestre, desde donde saldría impulsada hacia Júpiter mediante una sección superior motriz de cohete. Pero surgieron problemas en los primeros lanzamientos del transbordador y en el desarrollo de la sección motriz, con el consiguiente retraso del proyecto. Más tarde, en 1986, se produjo la tragedia del *Challenger*, en el preciso momento en que se ultimaban los preparativos del lanzamiento de la nave *Galileo*. Los ingenieros, obligados por las circunstancias a adoptar una sección motriz más segura, aunque menos potente, tuvieron que proyectar una trayectoria muy complicada, que, en sus aproximaciones a Venus y luego a la Tierra, aprovechaba la fuerza de la gravedad para conseguir el impulso que no le proporcionaba el nuevo cohete. El lanzamiento tuvo lugar en 1989 y el viaje duró seis años. A los dos del lanzamiento, la misión sufrió otro percance: no se desplegó la antena de comunicaciones principal, parecida a un paraguas, y la nave se quedó sólo con la antena auxiliar secundaria de capacidad limitada. Más adelante se atascó el equipo de grabación, indispensable para el almacenamiento de datos.



1. ATORMENTADA POR OCHENTA VOLCANES, la superficie de Io hace que, en comparación, la Tierra parezca geológicamente inerte. Las manchas amarillas, marrones y rojas de este mosaico en falso color (*imagen principal*) representan los minerales azufrados. Una escarcha de dióxido de azufre recubre las zonas blancas. Cuando el Sol ilumina la Luna desde un lado (*recuadro pequeño*) se aprecia que una gran cantidad de gas y polvo ha sido arrastrada hasta su órbita. La incandescencia amarillenta procede, en buena medida, del sodio gaseoso. La explosión de luz blanca es luz solar dispersada por el penacho del volcán Prometeo.



El gigante de gas,

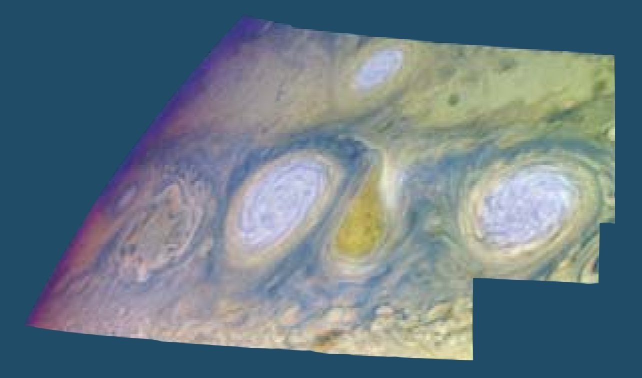
Júpiter

Antes de la misión *Galileo* ningún objeto salido de mano humana había entrado en contacto con un planeta gigante gaseoso. De la nave espacial descendió una sonda que se internó en la atmósfera de Júpiter, al norte del ecuador, en el punto que se indica en esta imagen, tomada por el *Telescopio Espacial Hubble*, una vez direccionada la sonda (*izquierda*). La sonda descendió durante más de una hora, mientras medía la composición (*tabla inferior*), hasta que sucumbió a la temperatura y la presión, enormes (*secuencia a la derecha*). Se da por cierto que la composición solar primordial era idéntica a la de las capas externas del Sol.

COMPOSICION QUIMICA DE LA ALTA ATMOSFERA
(Número de átomos por átomo de hidrógeno)

ELEMENTO	FORMA QUIMICA	JUPITER	SATURNO	EL SOL
HELIO	HELIO	0,078	$0{,}070 \pm 0{,}015$	0,097
CARBONO	METANO	$1{,}0 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$3{,}6 \times 10^{-4}$
NITROGENO	AMONIO	$4{,}0 \times 10^{-4}$	$3 \pm 1 \times 10^{-4}$	$1{,}1 \times 10^{-4}$
OXIGENO	AGUA	$3{,}0 \times 10^{-4}$	no se ha medido	$8{,}5 \times 10^{-4}$
AZUFRE	SULFURO DE HIDROGENO	$4{,}0 \times 10^{-5}$	no se ha medido	$1{,}6 \times 10^{-5}$
DEUTERIO	DEUTERIO	3×10^{-5}	3×10^{-5}	$3{,}0 \times 10^{-5}$
NEON	NEON	$1{,}1 \times 10^{-5}$	no se ha medido	$1{,}1 \times 10^{-4}$
ARGON	ARGON	$7{,}5 \times 10^{-6}$	no se ha medido	$3{,}0 \times 10^{-6}$
CRIPTON	CRIPTON	$2{,}5 \times 10^{-9}$	no se ha medido	$9{,}2 \times 10^{-10}$
XENON	XENON	$1{,}1 \times 10^{-10}$	no se ha medido	$4{,}4 \times 10^{-11}$

FUENTES: SUSHIL K. ATREYA, Universidad de Michigan; HASSO B. NIEMANN *NASA* Centro de vuelos espaciales Goddard



2. NUBES OVALADAS vistas por *Galileo* a principios de 1997. Entre ellas se extiende una región piriforme. Mientras los óvalos giran en sentido antihorario, la "pera" lo hace en sentido horario. En este mosaico de falso color, montado con tres imágenes captadas en el infrarrojo cercano, las nubes azuladas son delgadas, las blancas espesas y las rojizas profundas. Un año más tarde los óvalos se fundieron, un claro ejemplo del dinamismo del clima de Júpiter. Cada óvalo mide unos 9000 kilómetros de ancho.



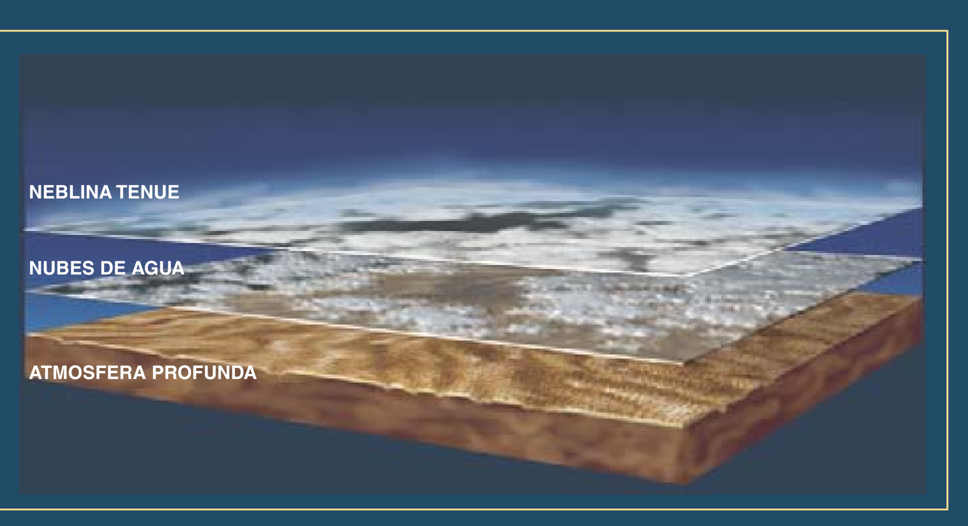
3. APERTURA EN LA CAPA SUPERIOR DE NUBES. Deja al descubierto las regiones calientes que hay más abajo. Como en otras imágenes del infrarrojo cercano, las nubes azuladas son delgadas, las blancas espesas y las rojizas profundas (*diagrama de la derecha*). La sonda de la misión *Galileo* entró en una región de éstas, un "punto caliente". La imagen muestra una zona de 34.000 kilómetros de ancho.

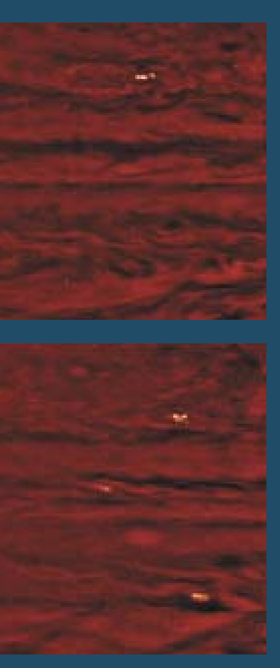
4. LA GRAN MANCHA ROJA constituye un inmenso sistema de tormentas que se alza unos 30 kilómetros por encima de la nubosidad circundante (*izquierda*). Del rojo al verde y del verde al azul el código de color representa decrecientemente la cantidad de metano a lo largo de la línea de visión. En consecuencia, las zonas blancas y rosadas son las más elevadas; las azuladas y negras, las más profundas. La tormenta tiene unos 26.000 kilómetros de largo; se formó quizá por inestabilidades del intenso flujo de aire planetario que corre entre este y oeste. La reproducción artística (*abajo*) exagera la escala vertical mil veces.



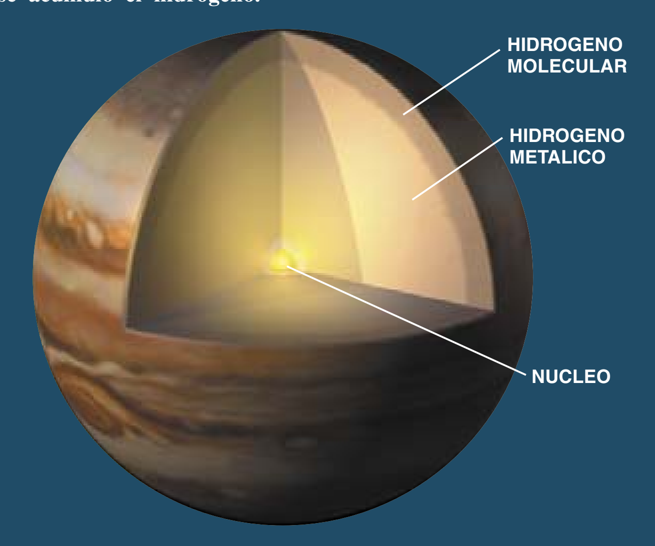
5. RELAMPAGOS en las imágenes tomadas por la nave orbital de la cara nocturna de Júpiter. La luz procedente de Io ilumina de forma tenue la capa de nubes de amoniaco. Los relámpagos se originan seguramente en nubes de agua cien kilómetros más abajo, con una frecuencia similar a la de las tormentas terrestres, pero brillan mil veces más. Cada imagen muestra una extensión aproximada de 60.000 kilómetros cuadrados.







6. EL INTERIOR DE JUPITER nos enseña que la expresión "gigante gaseoso" es una denominación inapropiada. El planeta se compone sobre todo de hidrógeno, que bajo una presión tan inmensa se ha vuelto líquido y metálico. La parte más profunda es un núcleo de roca, a cuyo alrededor se acumuló el hidrógeno.



Cuando se recibió el "bit de oro" que confirmaba que la sonda seguía viva, la sala de control respiró hondo. Pero hubo que esperar otras dos horas antes de que se produjera el segundo acontecimiento crítico: la entrada en órbita de la nave compañera. Para aminorar su velocidad de crucero interplanetaria y que la capturase la gravedad de Júpiter, los ingenieros activaron durante 45 minutos el motor principal. Por fin se recibió la señal que confirmaba el éxito de la maniobra. La nave orbital se convirtió así en el primer satélite artificial del planeta gigante.

Desde ese día de diciembre de 1995, una misión que parecía condenada al fracaso iba a proporcionar la primera visión pormenorizada del sistema joviano. (Las aproximaciones de las misiones *Pioneer* y *Voyager*, en los setenta, sólo consiguieron echar un rápido vistazo.) La sonda atravesó las nubes caleidoscópicas y tomó *in situ* muestras de la atmósfera, las primeras, de un planeta exterior; durante una hora transmitió datos antes de perderse en los abismos de gas. Por contra, la nave orbital todavía sigue en pleno funcionamiento. Ha fotografiado y analizado el planeta, sus anillos y satélites. Quizás el más célebre de sus resultados sea el respaldo otorgado a la hipótesis de un océano de agua líquida en el interior de Europa, una de las cuatro descubiertas por Galileo Galilei en 1610. También los otros satélites mayores han deparado sorpresas: haces de electrones que conectan a Io, el cuerpo de mayor actividad volcánica del sistema solar, con Júpiter; un campo magnético generado en el interior de Ganímedes, el primer campo descubierto en una luna; y los sutiles misterios de Calisto, con indicios de la existencia de un posible océano también en su interior.

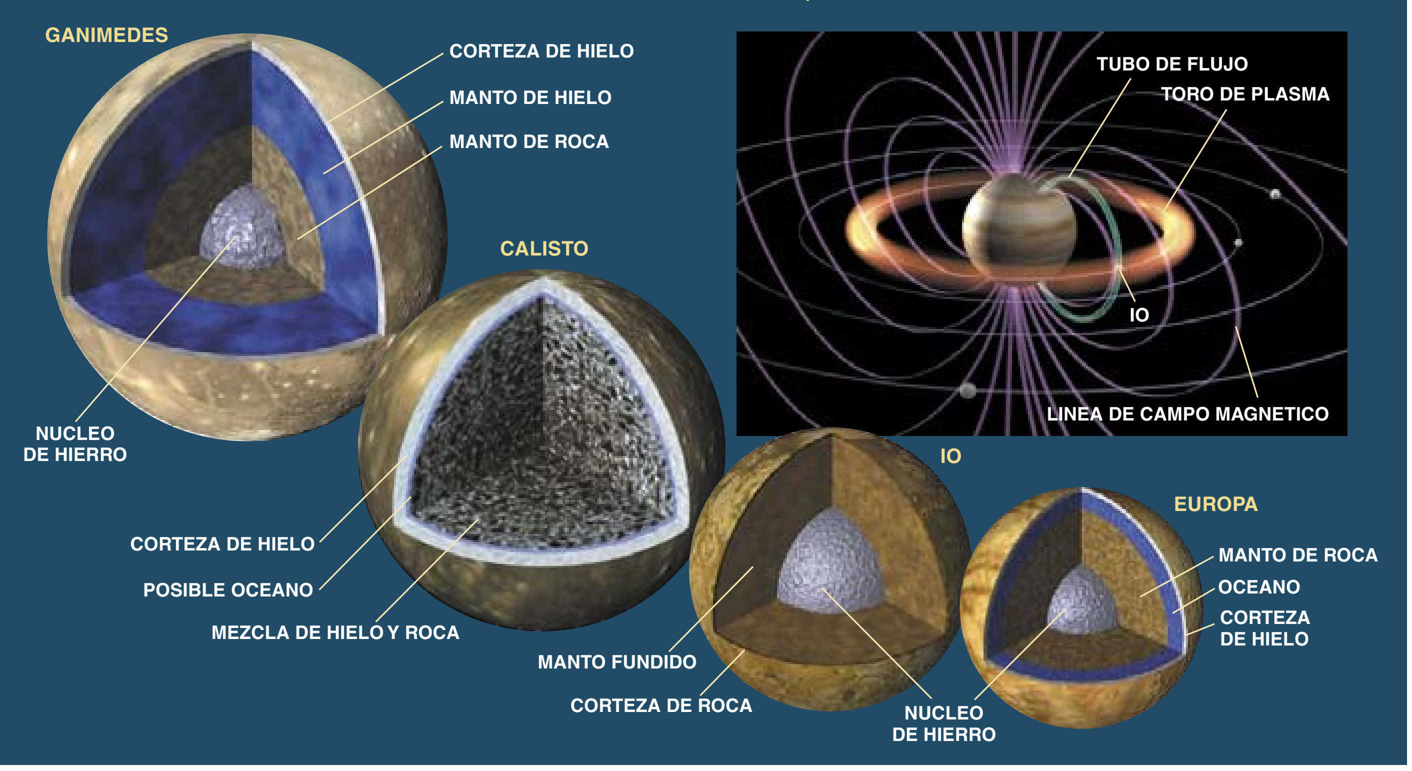
Corrientes de aire descendentes

De acuerdo con la teoría, la formación de Júpiter y los otros planetas gigantes a partir de la nebulosa solar primordial se produjo en dos etapas. Primero se aglomeraron planetesimales de hielo que, en esencia, eran grandes cometas condensados en la nube de gas y polvo. Luego, al alcanzar una masa crítica, el protoplaneta atrajo gas directamente de la nebulosa. En su comienzo, pues, Júpiter constituía una muestra del material primigenio del sistema solar, cuya composición coincidía, más o menos, con la del Sol primitivo. Desde

Interior y campos magnéticos de los
satélites galileanos

A los cuatro satélites galileanos de Júpiter les viene estrecho el apelativo lunar. En muchos aspectos se trata de planetas por derecho propio. Los dos interiores, Io y Europa, alcanzan la densidad y tamaño de nuestra Luna. De la talla de Mercurio, aunque bastante menos densos, son Ganímedes y Calisto, los dos exteriores.

Aunque *Galileo* no aterrizó en su superficie ni se incrustó en ella, deducimos la estructura interna de esos cuerpos a partir de sus fuerzas gravitatorias y campos magnéticos. De los cuatro, sólo Calisto carece de capas diferenciadas de metal, roca y agua helada. Los campos electromagnéticos de Júpiter interaccionan con los cuatro satélites, en especial con Io (*véase diagrama inferior*). Los campos recogen gases ionizados procedentes de las erupciones volcánicas de Io y crean un toro de plasma. Entre el planeta y sus lunas hay un tubo de flujo que transporta una corriente eléctrica de cinco millones de ampère. (Ni el planeta ni sus lunas están dibujados a escala.)



entonces lo han venido moldeando procesos de diferenciación interna y precipitación continua de material cometario. El objetivo principal de la sonda atmosférica era desentrañar tales procesos.

El hallazgo más misterioso quizá de la sonda tuvo que ver con las especies condensables, los elementos nitrógeno, azufre, oxígeno y carbono. Desde hace tiempo se sabe que Júpiter triplica la cuantía de carbono (en forma de gas metano) del Sol. Las otras especies (presentes en forma de amoniaco, sulfuro de amonio y agua) se condensan, así se cree, y constituyen capas de nubes a distintas alturas. Las impurezas de las gotas de las nubes, posiblemente de azufre o fósforo, confieren a cada capa su color característico. Se previó que la sonda descendiera allende la que se esperaba fuese la capa inferior de nubes, a una presión de 5 a 10 atmósferas, unos cien kilómetros por debajo de las nubes superiores de amoniaco congelado. Se esperaba que el parte meteorológico describiera allí un tiempo húmedo, nuboso, cálido y ventoso.

Sin embargo, los instrumentos apenas vieron nubes y detectaron sólo ligeras neblinas a un nivel de presión de 1,6 atmósferas. No abundaban ni el agua ni el azufre. El detector de rayos (un receptor de frecuencia modulada de pulsos de ruido parásito) registró sólo algunas descargas débiles. En resumen, era un tiempo seco y despejado. ¿Cómo pudo fallar la predicción meteorológica? Parte de la respuesta no tardó en llegar. Las imágenes del infrarrojo tomadas con telescopios terrestres descubrieron que la sonda había dado sin saberlo con una región atmosférica de un tipo especial, un punto caliente de cinco micras, esto es, un claro por donde se fuga la radiación infrarroja procedente de niveles más bajos y cálidos. Júpiter tiene muchas zonas como ésa, y cambian continuamente, de modo que era imposible programar la sonda para que las evitara o para que fuese a parar a una de ellas.

Sin embargo, la suerte (buena y mala) de descender en un punto caliente no resolvió del todo el misterio. Creíase que, incluso en esas regiones, los gases de las profundidades adonde iba a llegar la sonda se asemejarían a la composición media de la atmósfera en su conjunto. Si así fuera en efecto, Júpiter tendría una cantidad bajísima de oxígeno y azufre. Pero no se conoce ningún proceso que elimine dichos elementos con tamaña contundencia. Cabría la hipótesis alternativa de que la composición de los puntos calientes difiriera de la media, debido quizás a una gran corriente descendente de gas frío y seco procedente de la atmósfera superior.

Esta última posibilidad suscitaba algunas dudas, pero hoy parece ser la interpretación más verosímil. Momentos antes de que la sonda dejara de transmitir señales, se registró un drástico incremento de las concentraciones de agua, amoniaco y sulfuro de hidrógeno, como si se estuviese acercando a la base de una corriente descendente. Las imágenes de otro

notable punto caliente, tomadas por la nave orbital, mostraban que los vientos convergían en su centro, procedentes de todas las direcciones. El gas no podía sino ir hacia abajo. Los espectros tomados por la nave orbital revelaban que la abundancia de agua y amoniaco variaba en un factor de cien entre los diferentes puntos calientes, lo que apoyaba la hipótesis de que las condiciones meteorológicas locales determinaban los detalles de la composición de la atmósfera.

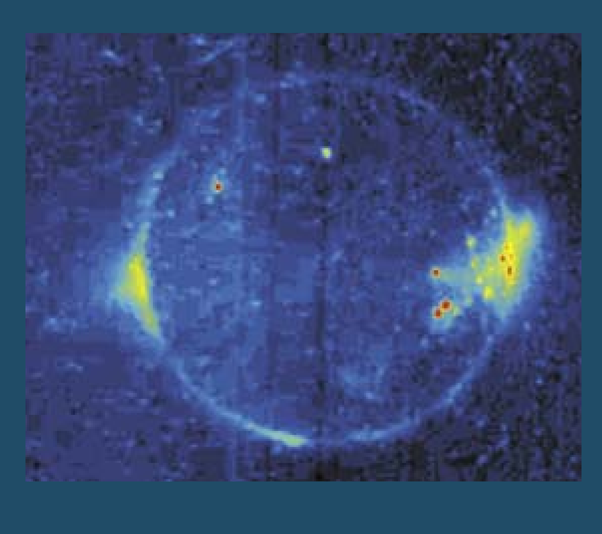
La única parte de la predicción meteorológica que resultó ser correcta fue la que aludía a un tiempo "ventoso". Las bandas de nubes de Júpiter están asociadas a chorros celerísimos: vientos del oeste y del este que soplan sin cesar y viajan a cientos de kilómetros por hora. En la Tierra los vientos de este tipo se aplacan cerca de la superficie. En Júpiter, donde no existe superficie, el perfil del viento depende de la fuente de energía dominante en la atmósfera. Si predomina una fuente de energía interna, piénsese en una lenta contracción producida por la fuerza de la gravedad, los vientos mantendrán o potenciarán su intensidad a medida que aumente la profundidad. Lo contrario sucederá si el factor principal es una fuente de energía externa, como la luz solar. La observación continuada de las radioseñales de la sonda enseñó que los vientos aumentan al principio rápidamente con la profundidad y luego permanecen constantes, prueba de que en la atmósfera de Júpiter impera una fuente de energía interna.

Llueve en los planetas

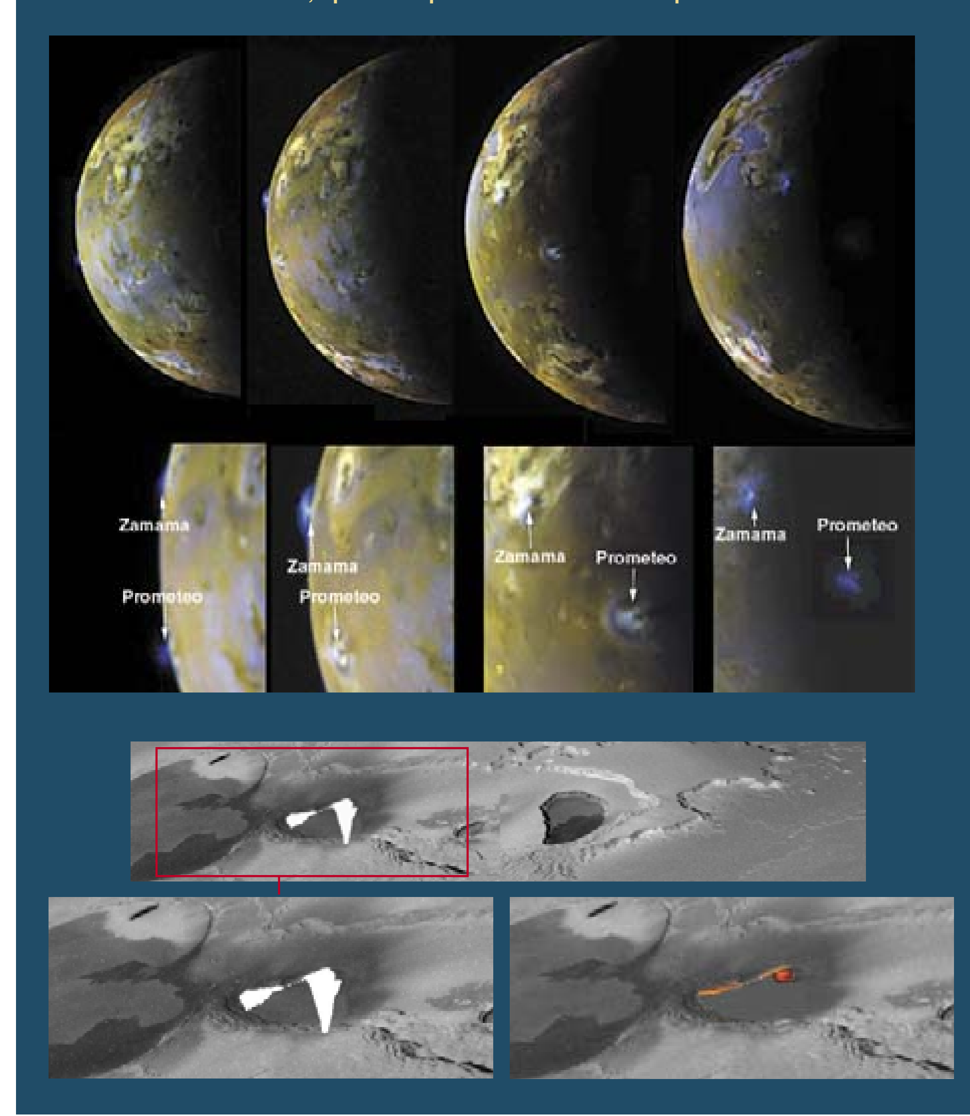
La sonda sólo detectó débiles indicios de relámpagos; la nave orbital, en cambio, observó brillantes destellos que iluminaban las nubes, que delataban fortísimas tormentas eléctricas. Al igual que los *Voyager*, la nave *Galileo* encontró que los relámpagos se concentraban en unas pocas zonas de latitud, regiones de cizalla anticiclónica, donde la velocidad de los vientos cambia bruscamente yendo de norte a sur y se crean condiciones turbulentas, tormentosas. Al igual que sucede en la Tierra, los relámpagos irrumpen en nubes de agua donde las cargas positivas y negativas se separan al ascender y descender los gránulos de hielo en las turbulencias. La profundidad a la que se producen los relámpagos se deduce del tamaño de la zona que se ilumina en las nubes; cuanto mayor sea, más profunda



Una luna infernal, Io

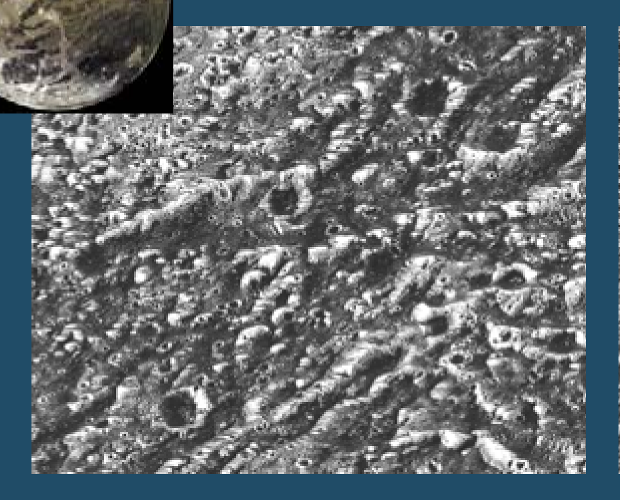


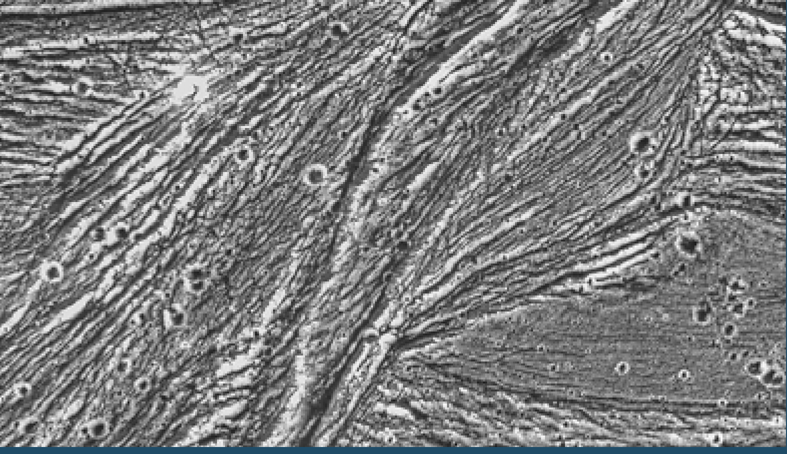
Io se reconocía con nitidez por su cromatismo en las imágenes tomadas por los *Voyager*. Gracias a que puede captar una mayor gama de longitudes de onda, la misión *Galileo* obtiene imágenes en falso color más espectaculares. Cuando está en la sombra de Júpiter (*arriba*), los torrentes de lava semejan pequeñas manchas rojas y amarillas. Los penachos volcánicos son los resplandores del borde del planeta; corresponde el de la izquierda al volcán Prometeo. Una secuencia de cuatro imágenes de color resaltado (*centro*) muestra la salida de Prometeo y Zamama, primero los penachos y, más tarde, los propios volcanes, rodeados por anillos de restos con un diámetro de más de cien kilómetros. En noviembre de 1999 *Galileo* captó un inmenso complejo volcánico en los meteoros septentrionales de Io (*abajo*). La imagen muestra varios cráteres y una enorme cortina de fuego. La lava fresca brilla con tal intensidad, que la exposición fue excesiva para la cámara CCD.





Una luna ceñida de hielo, Ganímedes





El mayor satélite del sistema solar es un extraño amasijo de suelos oscuros y brillantes. Las regiones oscuras, como Galileo Regio (*izquierda*), presentan muchos cráteres; el grande que se aprecia en la parte anterior de la imagen mide 19 kilómetros de diámetro. Los hoyos profundos podrían contener polvo dejado atrás al sublimarse el hielo de agua. Las regiones más luminosas, como Uruk Sulcus (*abajo*), tienen escasos cráteres y mayor variedad de accidentes tectónicos, desfiladeros por ejemplo. Esta imagen muestra una zona de unos 400 kilómetros cuadrados. Algunas regiones, como Tïamat Sulcus (*derecha*), que vemos aquí justo en su amanecer, presentan los dos tipos de suelo.

habrá sido la descarga. *Galileo* dedujo que los relámpagos surgían en capas de la atmósfera donde se presumía la formación de nubes de agua.

Tras tantos esfuerzos, antes de sucumbir por las altas presiones y temperaturas la sonda recorrió en su descenso menos del 0,1 por ciento del camino hasta el centro del planeta. No obstante, algunas de las medidas que tomó dan pistas de qué puede haber más abajo. Las concentraciones de los gases nobles —helio (el segundo elemento más abundante de Júpiter, tras el hidrógeno), neón, argón, criptón y xenón— son muy ilustrativas. Por tratarse de gases que no reaccionan químicamente con otros elementos, constituyen indicadores menos equívocos de las condiciones físicas que prevalecen en el interior del planeta. La concentración de helio proporciona tanta información, que la sonda atmosférica de la misión portaba consigo un instrumento dedicado exclusivamente a medirla.

Los espectros infrarrojos obtenidos por los *Voyager* sugerían que Júpiter contenía mucho menos helio, proporcionalmente, que el Sol, señal de que habría algún proceso que lo sacara de la alta atmósfera del planeta. La nave *Galileo* encontró, sin embargo, que Júpiter presentaba parejo contenido en helio que las capas exteriores del Sol. Se impone, pues, identificar qué proceso elimina de la atmósfera joviana el helio, habida cuenta de que las capas exteriores del Sol han perdido también helio. Un proceso que debió empezar en la historia del planeta más tarde de lo estimado. *Galileo* descubrió, además, que la concentración planetaria de neón era la décima parte de la solar.

Ambos resultados apoyan la hipótesis, antaño controvertida, de lluvias torrenciales de helio sobre las profundidades de Júpiter. Allí, el helio no puede mezclarse con la atmósfera rica en hidrógeno y sometida a millones de veces la presión que se registra a nivel del mar en la Tierra, conformando una suerte de océano. Al ser más pesado, el helio se va acumulando en la zona central del planeta. Bajo ciertas condiciones, el neón se disuelve en las gotas de lluvia de helio. El helio también podría precipitarse en Saturno, donde la merma quizá fuera aún mayor.

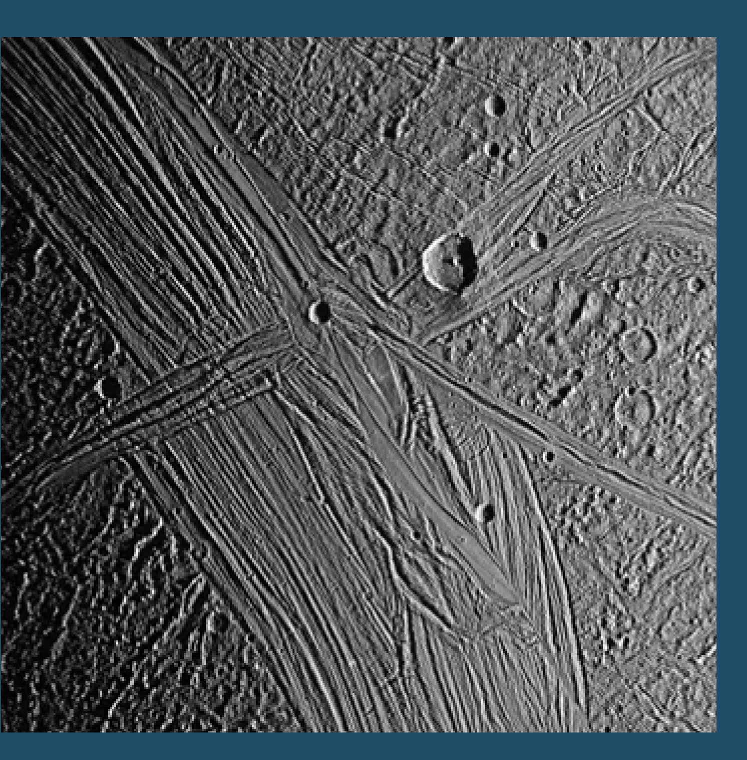
Tras varios años de análisis, se han hecho públicas las concentraciones de los demás gases nobles. Si se compara con la composición del Sol, hay un enriquecimiento en argón, criptón y xenón de más o menos la misma magnitud que en carbono y azufre. Ese es otro misterio. El único modo de "atrapar" las cuantías recortadas a estos gases es congelarlos, fenómeno imposible, dada la distancia actual entre Júpiter y el Sol. Por tanto, la materia que conforma el planeta debe provenir, en buena medida, de regiones más alejadas, más frías. Júpiter mismo se formó quizá más lejos del Sol, para ir luego acercándose, poco a poco, al interior del sistema solar.

Una última pista sobre la historia joviana procedió de la medición del deuterio, isótopo pesado del hidrógeno. Su concentración es similar a la que se detecta en el Sol y diferente de la observada en cometas y océanos terrestres. De donde se desprende que los cometas no han configurado la atmósfera de Júpiter, pese a la espectacularidad de sus choques contra ella, como los del Shoemaker-Levy 9 en 1994.

Un mundo en llamas

En cuanto la nave orbital envió los datos a Tierra tomados por la sonda, aquélla inició su gira por el sistema joviano. Hasta la fecha ha descrito un total de 26 órbitas alrededor del planeta y se ha aproximado múltiples veces a cada uno de los cuatro satélites galileanos. La atención se ha centrado en Europa, cuya geología superficial y otros rasgos del relieve nos hablan de la existencia de un océano líquido bajo el hielo en algún momento de su historia, tal vez no hace mucho a escala geológica. Pero no nos hemos olvidado de los otros satélites.

Io, el satélite galileano más próximo a Júpiter, fue el protagonista durante los encuentros con los dos *Voyager*. Las imágenes iniciales procedentes de esas misiones mostraron una superficie joven, la única en el sistema solar sin cráteres de impacto. Más tarde, unas imágenes tomadas por exigencias de la navegación captaron al azar inmensos penachos de erupciones. Las observaciones posteriores confirmaron que la actividad volcánica asuela Io.





Representación artística de la superficie

Galileo regresó a Io a finales de 1999. No sabíamos si la nave sobreviviría o no a la intensidad de la radiación. En una de las pasadas, quedó interrumpida la toma de datos cuatro horas antes de llegar a Io; desde tierra logramos reactivarla sólo unos minutos antes. Varios instrumentos que resultaron dañados seguían funcionando y captaron datos espectaculares. Los volcanes activos de Io se observaron por fin a corta distancia.

Su tamaño, equiparable al de nuestra luna, arroja cien veces más lava que la Tierra.

La nave *Galileo* ha dedicado menos tiempo a la observación de Io que a la de las otras lunas, para evitar un riesgo cierto. Io se halla inmersa en los cinturones de intensa radiación de Júpiter. *Galileo* realizó una aproximación a menos de 900 kilómetros de la superficie de la luna antes de entrar en órbita, en 1995; no volvió a Io hasta el mes de octubre de 1999, cuando ya se había completado la mayor parte de la misión y podían correrse mayores riesgos. Durante la aproximación de 1995 se suspendieron la toma de imágenes y la espectroscopía, para ahorrar problemas a la grabadora de cintas, proclive a atascarse; en cambio, permanecieron activos el detector de partículas y el magnetómetro.

Se descubrió que el espacio alrededor de Io no estaba vacío, sino repleto de partículas subatómicas liberadas por las erupciones volcánicas y agitadas por la acción del campo magnético de Júpiter. Haces de electrones viajan por las líneas de campo que conectan Io con la atmósfera de Júpiter. Inducidos por el campo magnético, los plasmas fríos y densos invaden la estela que el satélite deja a su paso. Cada vez que Io atravesaba la sombra de Júpiter, *Galileo* lo veía adornado de un anillo fino de gas incandescente, iluminado por el impacto de los electrones procedentes de la magnetosfera joviana. En resumen, Io se halla ligado al planeta gigante a través del mayor circuito eléctrico del sistema solar.

Durante la mayor parte de su misión, *Galileo* inspeccionó desde una distancia prudente la superficie atormentada de Io. Basándose en el brillo de los volcanes en diferentes longitudes de onda del visible y el infrarrojo cercano se calculó su temperatura, una medida clave para determinar la composición de los tipos de lava. Casi todos los volcanes terrestres arrojan lava de composición basáltica: hierro, magnesio y silicatos de calcio ricos en olivino y piroxeno. Las coladas basálticas alcanzan temperaturas entre los 1300 y 1450 grados kelvin. Por mor de comparación, las observaciones telescópicas de Io, realizadas años atrás, sugerían temperaturas de 1500 a 1800 grados kelvin. Estas cifras obligaron a descartar la presencia de sustancias con un punto de fusión inferior; el azufre líquido sin ir más lejos, hasta entonces supuesto integrante de los fluidos volcánicos de Io.

Cuando las mediciones de la nave *Galileo* llegaron a la Tierra el enigma se hizo aún más oscuro. Las lavas están en realidad entre 1700 y 2000 grados kelvin. Hace más de 3000 millones de años que en la Tierra no se encuentra magma a esas temperaturas. Por tanto, Io nos ofrecía quizá una estampa inesperada de las etapas primeras de la geología de la Tierra, cuando las temperaturas de su interior eran mayores y la composición del manto superior distinta de la actual.

En campo propio

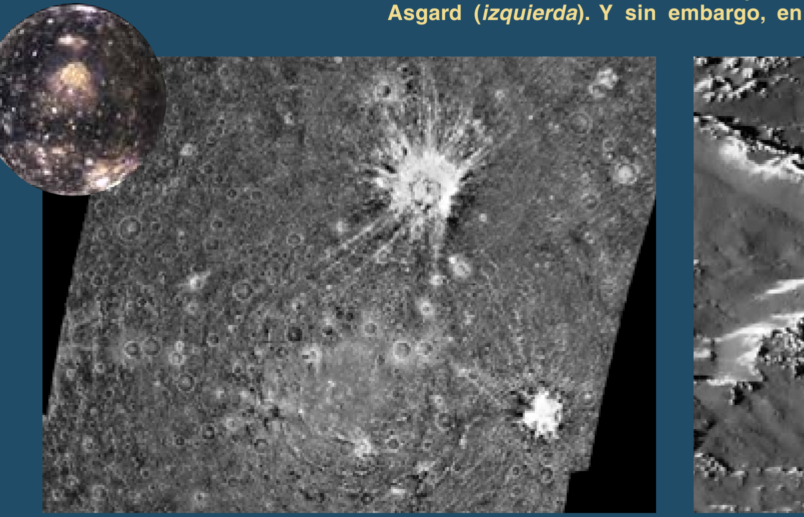
Uno de los principales éxitos que cosechó *Galileo* se produjo en su primer encuentro orbital. Fue con Ganímedes, la mayor luna de Júpiter. Alrededor de media hora antes de que llegara al punto de máxima aproximación, el instrumento de radiorruido, ideado para medir los campos eléctricos del entorno, empezó a volverse loco. El fondo de señales de radio relativamente silencioso que se percibe en la mayor parte del sistema joviano cambió de súbito y se convirtió en un radioespectro complejo y activo. Durante 45 minutos la actividad siguió siendo intensa, para cesar en seco, con igual instantaneidad con que había empezado. Cuando volvieron a aparecer las señales de radio las lecturas del magnetómetro se quintuplicaron.

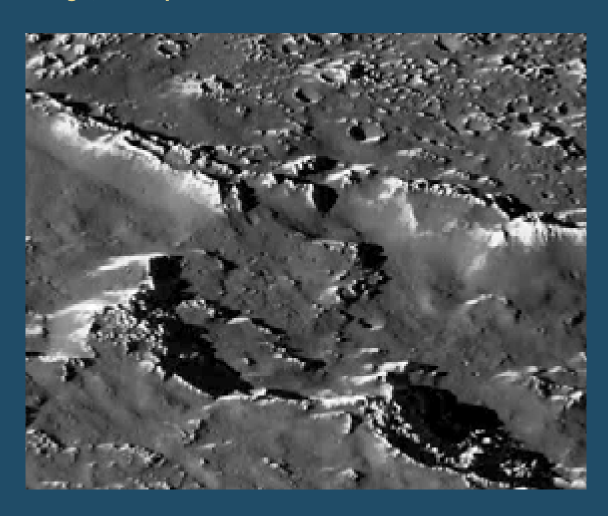
Los especialistas en plasmas conocían ya, por otras misiones, esas señales, coincidentes con la entrada y salida de las atmósferas de la Tierra, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Dos aproximaciones posteriores a Ganímedes confirmaron las sospechas: se trata de una luna de intensa actividad magnética, que genera un campo dipolar muy similar a los campos de dichos planetas. Ningún otro satélite conocido presenta un campo así. La Luna y Marte quizá lo tuviesen en el pasado, pero ahora sólo exhiben zonas de variación magnética muy restringidas, las de rocas de superficie magnetizadas. A la manera de una muñeca rusa, la magnetosfera de Ganímedes se incluye en el colosal dominio magnético de Júpiter, encajado, a su vez, en el solar.

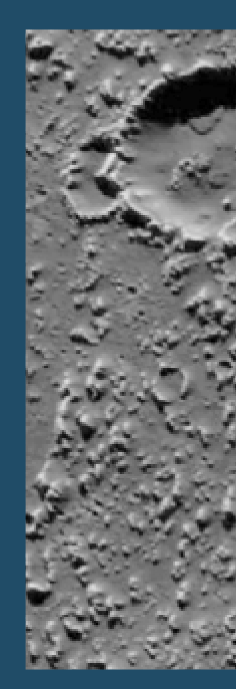
El seguimiento de la señal de la nave espacial nos permitió estudiar el campo de gravedad de Ganímedes y, por ende, su estructura interna. Según parece, el satélite posee un

Marcado de hoyuelos, Calisto

De todos los satélites galileanos el más desconcertante es éste, salpicado de grandes cráteres, como la inmensa estructura de impacto Asgard (*izquierda*). Y sin embargo, en comparación, no posee muchos cráteres pequeños y los que posee están desdibujados (*abajo y derecha*), lo que sugiere una pátina ulterior de material pulverulento.







núcleo muy denso, con un radio de unos 1500 kilómetros y un manto helado circundante de 700 kilómetros de profundidad. Los modelos geoquímicos sugieren que el núcleo consiste en una esfera de hierro o sulfuro de hierro recubierta de roca; el núcleo metálico interno podría crear el campo magnético dipolar.

Sin embargo, los teóricos no están del todo seguros. Los campos magnéticos planetarios suelen compararse a imanes de barra, pero es una analogía que puede inducir a confusión. En el centro de un planeta o satélite de gran tamaño el hierro sólido tendría una temperatura demasiado elevada para sustentar un campo magnético permanente. Ahora bien, un campo magnético implica la existencia de un líquido convectivo y conductor. Los modelos de Ganímedes indican que su interior puede calentarse hasta fundir el hierro o el sulfuro de hierro. Pero esos mismos modelos muestran que la convección cesaría con el gradual enfriamiento del núcleo; las condiciones necesarias para que se produzca la convección sólo deberían durar unos mil millones de años.

Quizá la respuesta se encuentre en la resonancia orbital de los tres satélites galileanos interiores. Io gira alrededor de Júpiter cuatro veces por cada dos giros de Europa y cada uno de Ganímedes. Al igual que sucede cuando empujamos un columpio a un ritmo que coincide con su período pendular natural, esa congruencia hace que pequeñas fuerzas se vayan acumulando y rindan grandes resultados: en este caso las órbitas se distorsionan y no dibujan circunferencias, sino elipses oblongas. Ello ejerce un efecto profundo sobre las lunas. Puesto que cambia de continuo la distancia entre los satélites y Júpiter, aumenta y disminuye la influencia de la gravedad del planeta y se deforman sus satélites en cuantía siempre variable. Este proceso de calentamiento de marea constituye la fuerza impulsora del vulcanismo de Io y evita que el supuesto océano de Europa se congele.

Nadie sospechaba que el calentamiento de marea adquiriera interés en Ganímedes, el más exterior de los satélites. Pero se admite ahora la posibilidad de que las órbitas se hayan modificado con el transcurso del tiempo. En consecuencia, las resonancias pudieron haber sido antaño más intensas y la órbita haber sufrido mayor perturbación. Quizá den testimonio de ese período anterior de calentamiento intenso los inmensos sistemas de fallas que surcan su superficie. Si tal fuera, Ganímedes persistiría en su proceso de enfriamiento; su núcleo podría seguir generando un campo magnético.

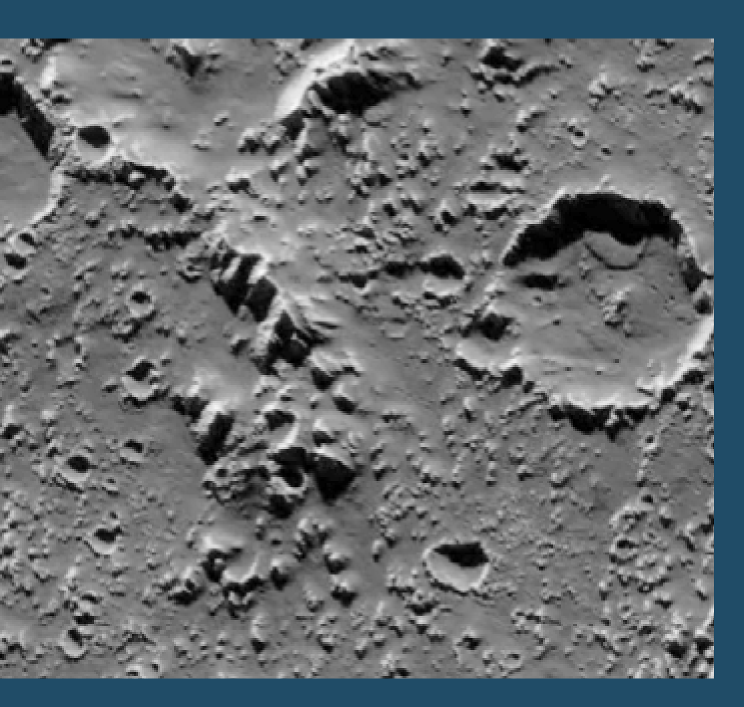
En comparación con Europa, Io y Ganímedes, deslumbrantes, a Calisto siempre le acompañó fama de anodino. En las imágenes tomadas por los *Voyager* era la viva estampa del típico satélite helado: una bola de limo vieja, helada y acribillada de marcas. Pero las observaciones actuales hilvanan otra historia sobre el más externo de los satélites galileanos.

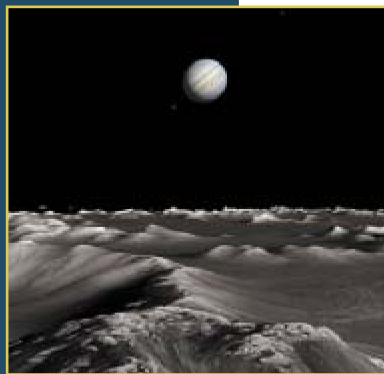
Viejo pero no aburrido

Calisto aparece cubierto de grandes cicatrices de impacto, desde cráteres kilométricos hasta el "palimpsesto Valhalla", de 1500 kilómetros de ancho, sobre una superficie de más de cuatro mil millones de años, acribillada por restos de cometas y meteoritos remanentes de la formación de planetas y satélites. En punto a edad, Calisto es una luna vieja. Pero, visto de cerca, presenta su superficie un manto de fino y oscuro material residual. Apenas si hay cráteres pequeños, que en la mayoría de los demás cuerpos celestes abundan. Los rasgos del relieve ofrecen un aspecto de suave erosión. Es evidente que ha actuado algún proceso en el pasado reciente. Entre los sugeridos se menciona la levitación electrostática de finas partículas de polvo, gracias a la cual podrían "fluir" por la superficie; se cita también la evaporación de hielos, que dejarían depósitos de materiales oscuros y menos volátiles. Hasta ahora ninguna explicación resulta satisfactoria.

Pero los espectros del infrarrojo cercano muestran no sólo agua helada y minerales hidratados, tal como se esperaba, sino también cuatro señales de absorción insólitas cerca de las cuatro micras de longitud de onda.

TORRENCE V. JOHNSON se ha asegurado la fama en el asteroide que lleva su nombre: 2614 Torrence, un cuerpo de un kilómetro de diámetro. Responsable del proyecto *Galileo*, participó en el programa de los *Voyager* e interviene en la aventura de la misión *Cassini* a Saturno.





Representación artística de la superficie

Una de ellas parece estar causada por el dióxido de carbono atrapado en la superficie, insertado quizá en partículas de hielo o burbujas al incidir en la superficie la radiación. Hay otros dos rasgos espectrales que respaldan la presencia de azufre en la superficie; podría haberse originado en las erupciones volcánicas de Io. El cuarto rasgo espectral es el más peculiar. Su longitud de onda coincide con la que absorben los enlaces carbono-nitrógeno. De hecho, los espectros de ciertas moléculas orgánicas complejas en forma de fulcro (Carl Sagan las llamó "tholins") son muy similares. Esos fulcros se asemejarían, en opinión de algunos, a la materia orgánica que encontramos en la nebulosa solar; las nubes de granos de hielo interestelar muestran espectros parecidos. Tomados en su conjunto, los datos proporcionan la primera prueba directa de que los satélites helados contienen los compuestos de carbono, nitrógeno y azufre comunes en los cometas y meteoritos primitivos, de capital importancia para la vida.

La estructura interna de Calisto evidencia la misma dicotomía paradójica entre vejez y juventud que apreciamos en su superficie. Recuerda, y en eso difiere de otros satélites galileanos, una esfera de densidad uniforme; de ello cabe inferir que gran parte de la roca y del hielo que contiene están mezclados. Se descarta que encierre un núcleo. Por tanto, el interior no ha sufrido nunca un calentamiento intenso, ni por las desintegraciones radiactivas ni por las mareas. Esta luna no participa en la resonancia orbital que tornea a los otros satélites galileanos.

Calisto dista mucho de estar muerto. Por el magnetómetro de *Galileo* sabemos que perturba de un modo peculiar el campo magnético joviano circundante. Perturbación muy distinta de la operada por Ganímedes. La de Calisto se asemeja a lo observado en los experimentos clásicos de física donde se somete una esfera hueca de cobre a la acción de un campo magnético cambiante. En esos ensayos se inducen corrientes eléctricas en el caparazón conductor de la esfera, que a su vez producen un campo magnético capaz de contrarrestar el campo impuesto. Así se habría inducido el campo de Calisto.

¿De qué estaría formada la capa conductora de electricidad? Las rocas, el hielo y las partículas ionosféricas son malos conductores. Sólo cabe el agua salada de mar, un conductor débil que tiene las propiedades necesarias para explicar las observaciones. Una capa de líquido global de varias decenas de kilómetros de espesor podría crear los resultados observados. Pero no es reto menor para los teóricos combinar las pruebas que apoyan la existencia de un interior apenas diferenciado con las que indican que posee un océano global. Tiene que haber algún mecanismo que caliente lo suficiente la luna y posibilite la existencia de un océano, mas sin alcanzar la temperatura a la que empezarían a separarse los materiales ligeros de los pesados. La capa de agua podría hallarse emparedada entre un interior calentado por la radiactividad —donde la convección mantendría mezclados los distintos materiales— y una superficie de hielo de poco grosor, donde un ciclo de convección distinto enfriaría el océano.

Aunque la misión *Galileo* se afanó en el estudio de las lunas galileanas, no se olvidó de los miembros menores de la familia de Júpiter. Su cámara captó a Metis, Adrastea, Amalthea y Thebe, ordenadas según su distancia a Júpiter. Gran importancia ha tenido el descubrimiento de que estas pequeñas lunas son responsables directos de los anillos de Júpiter. Mientras estaba a la sombra de Júpiter y las partículas de polvo de los anillos reflejaban la luz solar, la nave tomó una serie especial de imágenes en las que no sólo se ven los anillos principales y el finísimo que descubrieron los *Voyager* en 1979, sino que desvelan la compleja estructura de este último. Consta de múltiples capas relacionadas con las órbitas de Amalthea y Thebe. Muy probable resulta, pues, que los anillos consten de restos microscópicos lanzados desde las lunas por los impactos de micrometeoritos.

Los datos recogidos por la misión *Galileo* han transformado la imagen que se tenía de Júpiter y sus lunas. Ahora nos parece una especie de sistema planetario de complejidad equiparable a la del propio sistema solar. Si los *Voyager* nos abrieron nuevos mundos, la inquisición detallada de la nave *Galileo* ha revelado matices y limitaciones de categorías perfiladas, del estilo de "satélite helado" y "nube tormentosa".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REMOTE SENSING OF THE GALILEO ORBITER MISSION. Número especial de *Icarus*, vol. 135, n.º 1, septiembre de 1998.

ENCYCLOPEDIA OF THE SOLAR SYSTEM. Dirigida por Paul R. Weissman, Lucy-Ann McFadden y Torrence V. Johnson. Academic Press, 1999.

THE NEW SOLAR SYSTEM. Cuarta edición. Dirigido por J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Peterson y Andrew Chaikin. Sky Publishing, 1999.

Nuevo árbol de la vida

Hace unos diez años aparecían esbozadas las líneas básicas de la evolución. Parte de ese esquema, sobrio y elegante, comienza a cuestionarse

W. Ford Doolittle

Va para siglo y medio que Charles Darwin postulara el origen de todas las especies actuales a partir de otro elenco menor, surgido a su vez de otro más restringido, que procedía de otro más exiguo y así hasta el amanecer de la vida. A tenor de esa explicación, las relaciones de parentesco entre los organismos, modernos y extintos, podían plasmarse en un árbol genealógico.

La mayoría de los investigadores acepta ese planteamiento. Muchos alegan incluso que están perfectamente claros los rasgos generales del árbol, cuya raíz sería una célula, el antepasado común universal de todos los organismos, aparecida hace unos 3500 o 3800 millones de años. Aunque no resultó fácil ponerse de acuerdo sobre ese guión, se ha convertido en doctrina oficial desde hace poco más de un decenio.

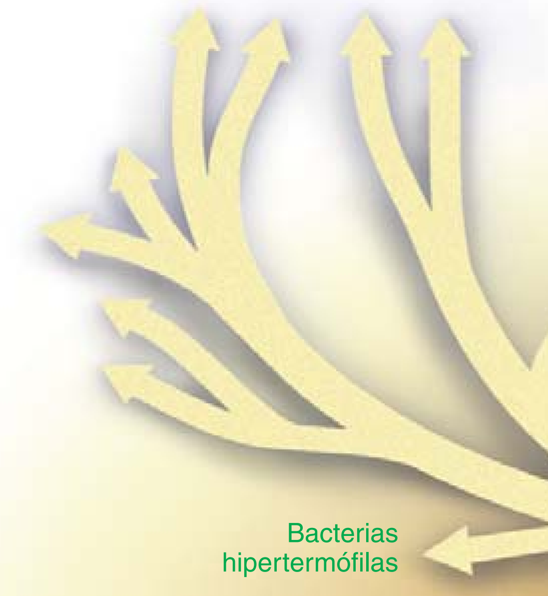
Mas, para sorpresa general, el árbol se tambalea. Descubrimientos recientes han empezado a minar los supuestos parentescos primeros, los inmediatos a la raíz.

El primer bosquejo

Hasta hace unos 35 años, a nadie se le ocurrió reconstruir un árbol universal. Desde Aristóteles, en el siglo IV antes de Cristo, hasta los años sesenta del siglo XX, se infería el parentesco entre organismos de su comparación anatómica, fisiológica o ambas. Con ese sistema se establecieron relaciones genealógicas razonables entre los organismos superiores. Los análisis de innumerables caracteres revelaban, por ejemplo, que los homínidos compartían antepasado con los primates, precursor que compartía con los simios otro ancestro; éste tenía en común con los prosimios otro antecedente, etcétera.

Pero los microscópicos seres unicelulares no solían aportar una información desbordante sobre sus relaciones de parentesco. La situación resultaba especialmente decepcionante, pues los microorganismos fueron los únicos habitantes de la Tierra durante la primera mitad, si no dos tercios, de la historia del planeta; la ausencia de una filogenia clara (árbol genealógico) para los microorganismos generaba en los científicos grandes dudas sobre la naturaleza y la secuencia de sucesos que dieron lugar a las innovaciones radicales en la estructura y función celular. Por ejemplo, entre el nacimiento de la primera célula y la aparición de hongos, plantas y animales, las células aumentaron en tamaño y complejidad, adquirieron un núcleo y un citoesqueleto (el andamiaje interno) y encontraron un mecanismo que les permitió alimentarse de otras células.

A mediados de los sesenta, Emile Zuckerkandl y Linus Pauling, del Instituto de Tecnología de California, idearon una estrategia revolucionaria que paliara esa falta de información. En vez de ceñirse a los caracteres anatómicos o fisiológicos, se plantearon la posibilidad



1. REPRESENTACION del árbol universal de la vida, según la doctrina mayoritaria. Propone ésta que los primeros descendientes del último ancestro común —una célula sin núcleo— dieron lugar a dos grupos de procariotas (células sin núcleo): las bacterias y las arqueas. Más tarde, a partir de las arqueas surgieron unos organismos cuyas células mostraban una estructura más compleja: los eucariotas. En el transcurso de su proceso evolutivo, los eucariotas adquirieron, al ingerir y retener en su citoplasma a ciertas bacterias, unos valiosos orgánulos capaces de generar energía, las mitocondrias; en el caso de las plantas, los cloroplastos.

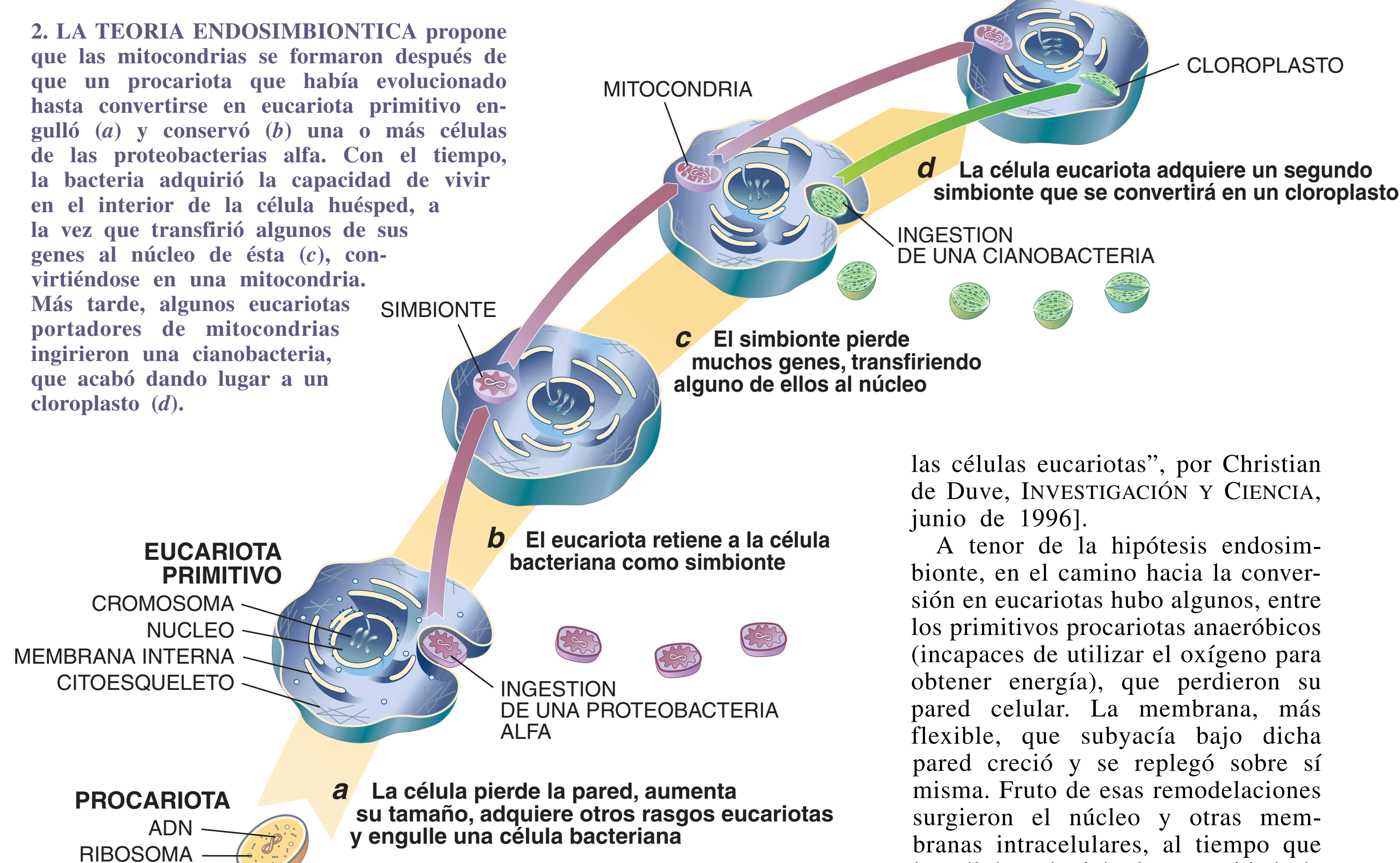
de utilizar diferencias en genes o proteínas para trazar parentescos y dependencias.

La filogenia molecular, así se llama el método, resulta ser de una lógica implacable. Los genes, constituidos por secuencias específicas de nucleótidos, son los responsables de la síntesis de proteínas, compuestas por cadenas de aminoácidos. Pero los genes mutan (cambian su secuencia), lo que no pocas veces redunda en alteración de la proteína cifrada. Las mutaciones genéticas que no dejan sentir su efecto en la función de la proteína o que la mejoran, se acumularán a lo largo del tiempo. Y así, conforme dos especies van alejándose de su antepasado común, las secuencias de sus genes irán también divergiendo, divergencia que se acrecienta con el transcurso de las generaciones. Para reconstruir el pasado evolutivo de los organismos —sus árboles filogenéticos— habrá, pues, que atender a las semejanzas y diferencias existentes entre las secuencias de sus genes o proteínas.

Hace 35 años se lograban las primeras secuenciaciones de aminoácidos de las proteínas; los genes tendrían que esperar. Los estudios realizados con proteínas, a lo largo de los años sesenta y setenta, demostraron la validez de la filogenia molecular al confirmar, y extender luego, los árboles filogenéticos de los vertebrados, grupo cabalmente conocido. Refrendaron, además, algunas hipótesis sobre la relación existente entre ciertas bacterias; demostraron, por ejemplo, que las bacterias que producen oxígeno durante la fotosíntesis forman un grupo homogéneo, el de las cianobacterias.

Con el recurso creciente a las secuencias proteicas, Carl R. Woese, de la Universidad de Illinois, fijó la atención en un nuevo parámetro de distancias evolutivas: el ARN ribosómico microsubunitario (“small subunit ribosomal RNA”, SSU rRNA). Esta molécula, genéticamente determinada, constituye un componente clave de los ribosomas, las “fábricas” celulares que sintetizan las proteínas; en efecto, las células necesitan dicha microsubunidad para vivir. Así las cosas, Woese pensó —nos hallamos en las postrimerías de los años sesenta— que las variaciones experimentadas por la microsubunidad (o, con mayor exactitud, por los genes que la cifran) serían un excelente indicador del grado de parentesco entre los seres vivos, de las bacterias elementales a los animales complejos. Por consiguiente, el ARN ribosómico microsubunitario podría desempeñar la función, en palabras de Woese, de “cronómetro molecular universal”.

Al principio, los métodos para avanzar en dicho proyecto eran indirectos y laboriosos. Pero hacia el ocaso



2. LA TEORIA ENDOSIMBIONTICA propone que las mitocondrias se formaron después de que un procariota que había evolucionado hasta convertirse en eucariota primitivo engulló (*a*) y conservó (*b*) una o más células de las proteobacterias alfa. Con el tiempo, la bacteria adquirió la capacidad de vivir en el interior de la célula huésped, a la vez que transfirió algunos de sus genes al núcleo de ésta (*c*), convirtiéndose en una mitocondria. Más tarde, algunos eucariotas portadores de mitocondrias ingirieron una cianobacteria, que acabó dando lugar a un cloroplasto (*d*).

de los años setenta, Woese contaba ya con suficientes datos para extraer sus importantes conclusiones. Desde entonces, los expertos en filogenia que estudian la evolución microbiana, lo mismo que los interesados en las ramas superiores del árbol, han basado sus pautas de ramificación en el análisis de la secuencia de los genes del ARNr microsubunitario. Este cúmulo de secuencias de ARNr resultó determinante para forzar, a finales de los ochenta, un acuerdo común sobre la estructura del árbol universal. Hoy se dispone de secuencias de ARNr de varios millares de especies.

Desde el comienzo, los resultados obtenidos con el ARNr corroboraron algunas intuiciones, al par que produjeron inesperadas sorpresas. En los años sesenta, los microscopistas habían arribado a la conclusión de que el mundo de lo vivo podía dividirse en dos grandes dominios, *Eukarya* (eucariotas) y *Bacteria* (procariotas), en razón de la estructura de sus células. Los organismos eucariotas (animales, plantas, hongos y muchos seres unicelulares) contenían un núcleo verdadero (un orgánulo donde alojan los cromosomas, intracelular y envuelto por una membrana). Las células eucariotas presentaban, por su lado, otras características específicas; así, un citoesqueleto, un intrincado sistema de membranas internas y mitocondrias (orgánulos en los que tiene lugar la respiración aeróbica que permite la obtención de energía a partir de los nutrientes). En las células de las algas y las plantas superiores distinguíanse los cloroplastos (orgánulos en los que se lleva a cabo la fotosíntesis).

A los procariotas, sinónimo entonces de bacterias, se les consideraban células sencillas, sin núcleo y protegidas por una membrana y una pared externa rígida.

Los primeros datos obtenidos por Woese confirmaban la distinción entre procariotas y eucariotas al demostrar que las secuencias de los ARNr microsubunitarios bacterianos guardaban entre sí un mayor parecido que con las secuencias de los ARNr eucariotas. Los hallazgos iniciales a propósito de esa molécula otorgaron también credibilidad a uno de los temas más interesantes de la biología celular evolutiva: la hipótesis del endosimbionte, avanzada para explicar el mecanismo en cuya virtud las células eucariotas adquirieron mitocondrias y cloroplastos [*véase* "El origen de las células eucariotas", por Christian de Duve, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1996].

A tenor de la hipótesis endosimbionte, en el camino hacia la conversión en eucariotas hubo algunos, entre los primitivos procariotas anaeróbicos (incapaces de utilizar el oxígeno para obtener energía), que perdieron su pared celular. La membrana, más flexible, que subyacía bajo dicha pared creció y se replegó sobre sí misma. Fruto de esas remodelaciones surgieron el núcleo y otras membranas intracelulares, al tiempo que la célula adquiría la capacidad de engullir y digerir procariotas vecinos, sin tener que recabar siempre los nutrientes por adsorción de pequeñas moléculas de su entorno.

Llegó un momento en que uno de los descendientes de nuestro eucariota primitivo ingirió células bacterianas del grupo de las proteobacterias alfa, duchas en obtener energía por respiración. Pero en vez de digerir tales células bacterianas, como si se tratara de mera nutrición, el eucariota estableció una relación mutuamente beneficiosa (simbióntica) con ellas. El eucariota daba cobijo a las bacterias engullidas, y el "endosimbionte" le proveía de energía extra gracias a la respiración. Por último, los endosimbiontes perdieron los genes que hasta entonces precisaban para su crecimiento independiente y transfirieron otros al núcleo de la célula hospedadora, terminando por transformarse en mitocondrias. En un proceso similar, los cloroplastos derivan de cianobacterias engullidas, y retenidas, en cierto momento de su historia por una célula eucariota portadora de mitocondrias.

Las mitocondrias y los cloroplastos de las células eucariotas actuales conservan todavía un escueto número de genes; entre ellos, los que codifican el ARNr microsubunitario. Por consiguiente, y una vez se dispuso de las

W. FORD DOOLITTLE, que se formó en Harvard y Stanford, enseña bioquímica y biología molecular en la Universidad de Dalhousie en Halifax. Dirige también el programa de biología evolutiva del Instituto Canadiense de Investigaciones Avanzadas.

herramientas apropiadas a mediados de los años setenta, los investigadores decidieron comprobar si esos genes que cifran el ARNr microsubunitario se habían heredado, respectivamente, de las proteobactarias alfa y de las cianobacterias, en consonancia con lo predicho por la teoría endosimbionte. Se demostró que así era.

Pero la paz conseguida se vio turbada por una idea arriesgada. Estamos a finales de los setenta. Woese aseguró entonces que el cuadro de la vida que pivotaba sobre los dos dominios, el de las bacterias (*Bacteria*) y el de los eucariotas (*Eukarya*), debía ceder el paso a otro que incorporase un tercer dominio.

Algunos procariotas adscritos a las bacterias, aunque a éstas se parecieran, en su genética distaban mucho, sostenía Woese. De entrada, el ARNr respaldaba una divergencia precoz. De muchas de estas especies se conocía ya su comportamiento peculiar, sin ir más lejos su preferencia por vivir en condiciones ambientales extremas; nadie, sin embargo, había cuestionado su "estatuto bacteriano". Woese sugería ahora que conformaban un tercer dominio (*Archaea*), no menos distante de las bacterias que éstas de los eucariotas.

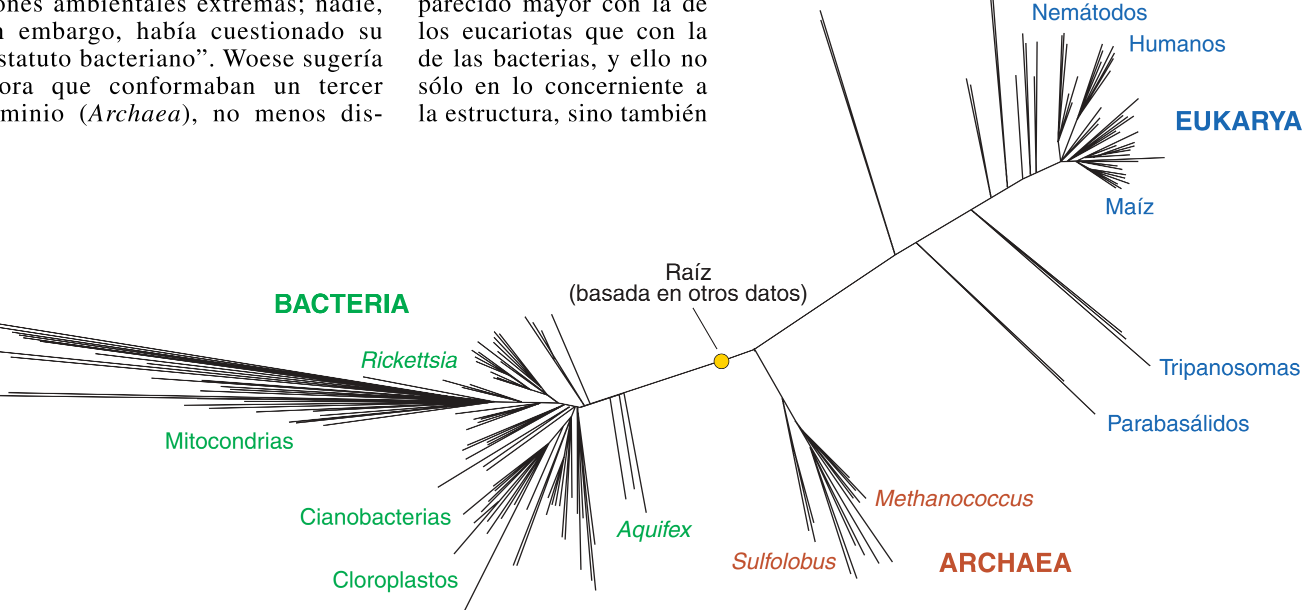
Tras la polémica, el acuerdo

Contra la propuesta de Woese se opuso una feroz resistencia inicial. Pero la mayoría acabó por convencerse. En la aceptación tuvo que ver la estructura global de ciertas moléculas de especies arqueanas, que corroboraba la organización tripartita. Por citar un dato, las membranas celulares de todas las arqueas contenían lípidos de características únicas y muy diferentes —en sus propiedades físicas y en su constitución química— de los lípidos bacterianos.

También, las proteínas de las arqueas responsables de diversos procesos celulares cruciales presentan una estructura diferente de las proteínas que ejecutan las mismas tareas en las bacterias; así ocurre en los procesos de transcripción y traducción. Para sintetizar una proteína, la célula copia, o transcribe, el gen correspondiente en una cadena de ARN mensajero. A continuación, los ribosomas traducen la información del ARN mensajero en una ristra específica de aminoácidos. Los bioquímicos descubrieron que la ARN polimerasa de las arqueas, la enzima que lleva a cabo la transcripción, guarda un parecido mayor con la de los eucariotas que con la de las bacterias, y ello no sólo en lo concerniente a la estructura, sino también en la naturaleza de su interacción con el ADN. Las proteínas arqueanas que forman parte de los ribosomas que traducen el ARN mensajero también se asemejan más a las eucariotas que a las bacterianas.

Aceptada la tesis de la división de la vida en tres dominios, había que dilucidar de cuál de los dos grupos primitivos —bacterias y arqueas— se originó la primera célula eucariota. Los estudios sobre el parentesco entre la maquinaria de transcripción y traducción de los eucariotas y las arqueas revelaron que los primeros provenían de éstas.

Semejante conclusión recibió un nuevo espaldarazo en 1989, cuando los grupos liderados por J. Peter Gogarten y Takashi Mikaya utilizaron las secuencias de otros genes en su afán de identificar la raíz del árbol universal. La comparación de los ARNr microsubunitarios ("SSU rRNA") puede decirnos qué organismos están estrechamente emparentados entre sí; mas la técnica en cuestión resulta incapaz de revelar qué grupos son más primitivos y, en consecuencia, más cercanos a la raíz. El análisis de las secuencias de ADN que cifran dos proteínas celulares esenciales confirmaba que el último ancestro común engendró



3. REPRESENTACION de las relaciones de parentesco existentes entre los ARN ribosómicos (ARNr) procedentes de unas 600 especies. Cada línea equivale a la secuencia del ARNr de una especie o un grupo; la mayoría de las líneas corresponde a ARNr cifrados por genes del núcleo, aunque hay también genes de ARNr de cloroplastos y mitocondrias. Las líneas de los ARNr mitocondriales deben su mayor longitud a la rápida evolución de los genes mitocondriales. Los árboles construidos a partir de los ARNr carecen de raíz; otra serie de datos sitúan a ésta en el punto coloreado, que corresponde a la parte inferior de los árboles de la figura 1.

a bacterias y arqueas; de éstas se ramificaron luego los eucariotas.

Desde 1989, un rosario de descubrimientos han venido cementando la tesis del triple dominio. En los cinco últimos años se han hecho públicas las secuencias completas del genoma (conjunto de todos los genes) de media docena de arqueas y de más de 15 bacterias. La comparación de estos genomas ha confirmado la sospecha de que bastantes genes implicados en la transcripción y en la traducción de las arqueas y de los eucariotas son muy similares, así como que estos procesos se desarrollan de forma muy parecida en ambos dominios. Pese a que las arqueas carecen de núcleo diferenciado, bajo ciertas condiciones experimentales sus cromosomas recuerdan a los de los eucariotas: el ADN forma complejos con unas proteínas muy parecidas a las histonas de éstos, y sus cromosomas pueden adoptar la estructura eucariota de collar de perlas. Además, en la replicación de tales cromosomas interviene una serie de proteínas muy parecidas a las que participan en los mismos procesos de los eucariotas, pero no en los bacterianos.

Dudas persistentes

Con esa muchedumbre de datos extraordinarios y congruentes se pergeñó la estructura del árbol genealógico universal, que hoy acepta la mayoría. A tenor de dicho cuadro, la vida se desdobló primero en bacterias y arqueas. A continuación, los eucariotas surgieron de un precursor arqueoideo. Seguidamente, los eucariotas incorporaron genes bacterianos en dos ocasiones, recabando mitocondrias de las proteobacterias alfa, y cloroplastos, de las cianobacterias.

Con todo, a medida que vamos disponiendo de un número creciente de secuencias completas de genomas, varios grupos (incluido el mío) han detectado algunos hechos que contradicen las ideas en vigor. Si el árbol aceptado fuese correcto, en las células eucariotas sólo descubriríamos genes de origen bacteriano en el ADN de las mitocondrias y de los cloroplastos, aparte de los que se transfirieron al núcleo desde los precursores alfaproteobacterianos y cianobacterianos de estos orgánulos. Los genes transferidos serían, por otra parte, los implicados en la respiración o en la fotosíntesis, no los responsables del resto de los procesos celulares, que se habrían heredado de la arquea ancestral.

Pero esa hipótesis no se ha cumplido. Genes presentes en el núcleo de los eucariotas provienen, con frecuencia, no sólo de las arqueas sino también de las bacterias. Un buen número de tales genes de origen bacteriano participan en el control de funciones que no tienen nada que ver con la respiración y la fotosíntesis y que son, sin embargo, tan fundamentales para la supervivencia celular como la transcripción y la traducción.

En el árbol clásico se lee también que los genes de origen bacteriano fueron incorporados por los eucariotas y no por las arqueas. Pero existen numerosas pruebas de que muchas arqueas portan un cupo nutrido de genes bacterianos. Mencionemos, como botón de muestra, el caso de *Archaeoglobus fulgidus*, que reúne todas las características de una arquea (lípidos adecuados en su membrana celular y mecanismos de transcripción y traducción esperados) y, sin embargo, emplea una forma bacteriana de la enzima HMGCoA reductasa para sintetizar los lípidos de la membrana. Presenta, además, numerosos genes bacterianos que le ayudan a conseguir energía y nutrientes en los pozos petrolíferos submarinos, uno de sus medios favoritos.

La explicación razonable de resultados tan contradictorios hay que buscarla en el proceso de la evolución, que ni es lineal ni tan parecida a la estructura dendriforme que Darwin imaginó. Aunque los genes se han transmitido de generación en generación, esta herencia vertical no es el único factor involucrado en la evolución de las células. Otro fenómeno —la transferencia lateral u horizontal de genes— ha afectado profundamente el curso evolutivo. En vez de pasar de una célula progenitora a su descendiente, en la transferencia horizontal se transmiten genes individuales, o serie de ellos, de una especie a otra.

Vía el mecanismo de transferencia lateral, los eucariotas evolucionados de una célula arquea obtuvieron genes bacterianos decisivos para el metabolismo: los eucariotas recabaron de las bacterias genes y retuvieron los que demostraron su utilidad. Ese mecanismo explicaría por qué hay arqueas que terminaron por poseer genes habituales en bacterias.

Algunos teóricos de la filogenia molecular —entre ellos Mitchell L. Sogin y Russell F. Doolittle— atribuyen a la transferencia lateral un misterio que se resiste. Muchos genes eucariotas difieren de los de bacterias y arqueas conocidas. Se ignora de dónde pudieron haber venido. Nos referimos, en particular, a los genes responsables de la síntesis de los componentes del citoesqueleto y del sistema interno de membranas, un par de rasgos distintivos de las células eucariotas. Sogin y Doolittle apuntan la existencia de un cuarto dominio de organismos, extinguido en la actualidad, que transfirió horizontalmente al núcleo de las células eucariotas los genes responsables de estos caracteres.

4. ARBOL FILOGENETICO de varios grupos de especies, construido a partir del gen que determina la enzima HMGCoA reductasa. En este árbol sumario se aprecia que el gen de la reductasa de *Archaeoglobus fulgidus*, una típica arquea, proviene de una bacteria, no de un antepasado arqueo. Se suma tal descubrimiento a los muchos aducidos para reafirmar la idea de que la transferencia génica lateral ha desempeñado un papel decisivo en la evolución de la vida unicelular. El árbol universal aceptado no tiene en cuenta este factor.

Desde hace tiempo sabe la microbiología de la capacidad de las bacterias para el intercambio horizontal de genes. Se lo confirma la cesión de genes de resistencia a los antibióticos entre bacterias infecciosas. Pero muy pocos sospechaban que los genes esenciales para la supervivencia celular cambiaran frecuentemente de célula o que la transferencia lateral ejerciera un peso tan determinante en los albores de la historia de la vida microbiana. Por lo que se ve, los expertos andaban errados.

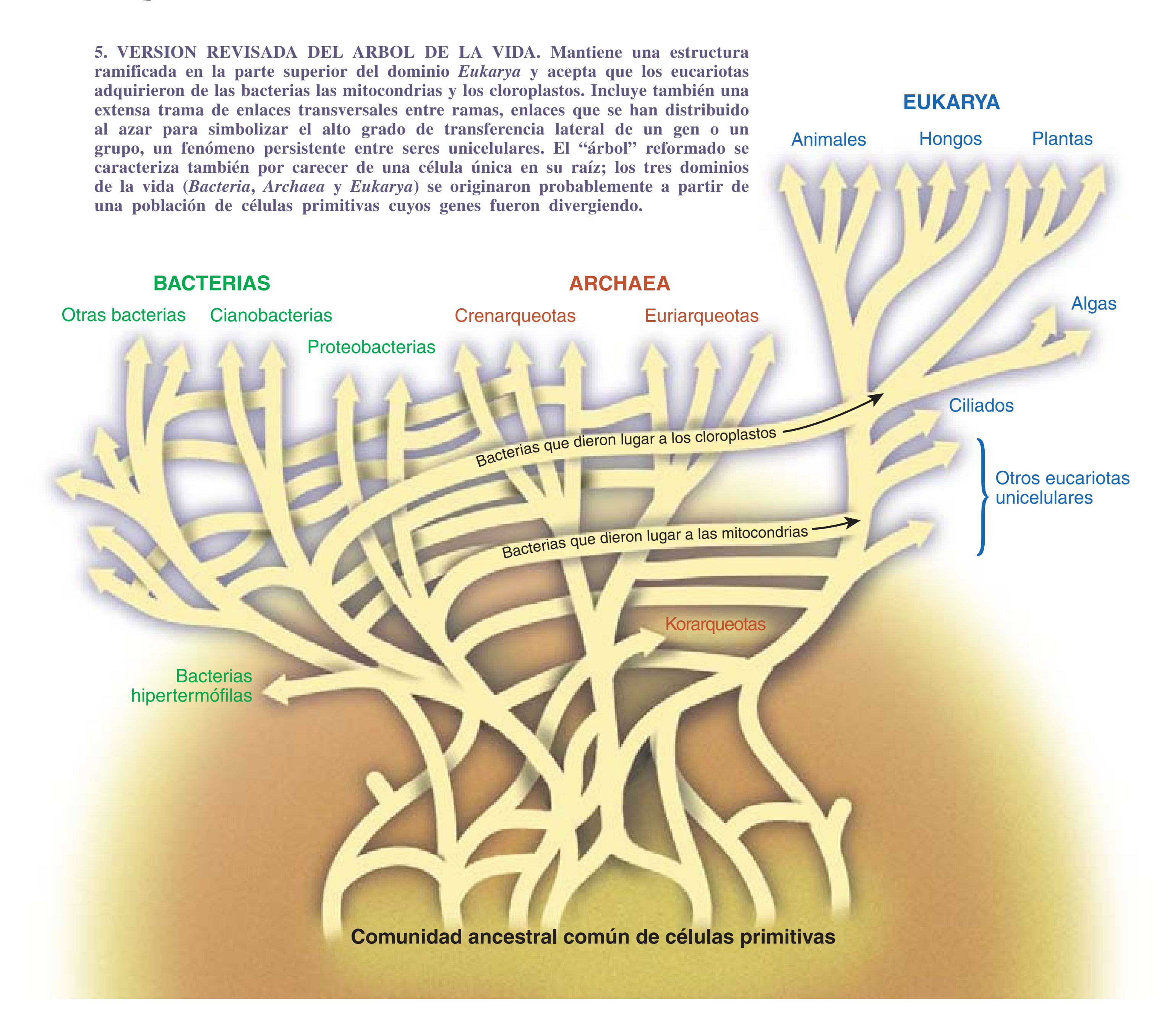
¿Sobrevivirá el árbol?

¿Qué nos dicen los nuevos descubrimientos acerca de la estructura del árbol universal de la vida? Una primera enseñanza a extraer es que el progreso armonioso de arqueas a eucariotas, plasmado en el árbol actual, peca de un exceso de simplificación, si no es erróneo. Al parecer los eucariotas no emergieron de una arquea, sino de alguna célula precursora resultante de una serie de transferencias horizontales de genes, que terminaron por modelarla en parte bacteriana, en parte arquea y en parte otras cosas.

Múltiples testimonios siguen respaldando todavía la hipótesis endosimbionte, según la cual las mitocondrias eucariotas derivan de las proteobacterias alfa, y los cloroplastos, de la ingestión de cianobacterias. Con todo, sería arriesgado ceñir a ésas las transferencias génicas laterales que ocurrieron tras la aparición del primer eucariota. Más tarde, para evitar la transferencia génica lateral los eucariotas multicelulares se blindaron con la adquisición de células germinales independientes (y protegidas).

La representación estándar de las relaciones de parentesco entre procariotas parece ser demasiado lineal para resultar cierta. Un conjunto de genes y propiedades bioquímicas agrupa a las arqueas y los distinguen de las bacterias, siendo así que entre bacterias y arqueas (al igual que entre las diferentes especies englobadas dentro de cada uno

5. VERSION REVISADA DEL ARBOL DE LA VIDA. Mantiene una estructura ramificada en la parte superior del dominio *Eukarya* y acepta que los eucariotas adquirieron de las bacterias las mitocondrias y los cloroplastos. Incluye también una extensa trama de enlaces transversales entre ramas, enlaces que se han distribuido al azar para simbolizar el alto grado de transferencia lateral de un gen o un grupo, un fenómeno persistente entre seres unicelulares. El "árbol" reformado se caracteriza también por carecer de una célula única en su raíz; los tres dominios de la vida (*Bacteria*, *Archaea* y *Eukarya*) se originaron probablemente a partir de una población de células primitivas cuyos genes fueron divergiendo.



de estos dos grupos) ha existido un amplio intercambio de genes.

Para definir parentescos evolutivos entre los procariotas, podríamos escoger los genes que parecen menos propensos a la transferencia. En ese contexto, muchos filogenéticos consideran que los genes de los ARNr microsubunitarios y las proteínas implicadas en la transcripción y la traducción son renuentes a la transferencia horizontal, por cuya razón el árbol filogenético basado en ellos mantiene su validez. Ahora bien, tal renuencia a la transferencia es un mero supuesto no demostrado; en cualquier caso, debemos aceptar que los árboles sólo compendian la historia evolutiva de una parte del genoma de un organismo. Lo que entendemos por árbol aceptado constituye una representación gráfica harto esquemática.

¿Cuál sería el modelo más acorde con la realidad? Aquel que en la copa presentara la estructura dendriforme ramificada de animales, plantas y hongos multicelulares. Las transferencias génicas implicadas en la formación de las mitocondrias y cloroplastos de los eucariotas a partir de las bacterias se representarían mediante la fusión de ramas principales. Por debajo de estos puntos de transferencia (y dentro de los actuales dominios *Bacteria* y *Archaea*) observaríamos numerosas fusiones adicionales de ramas. En la profundidad del dominio procariota, en la base quizá del dominio eucariota, sería impropio imaginarse un tronco principal.

Aunque más compleja, esta imagen revisada seguiría pecando de una simplificación engañosa. Casi una caricatura, pues las fusiones entre ramas no representarían la unión de genomas completos, sino la transferencia de genes o grupos de genes. Para que pintáramos entero el cuadro, tendrían que plasmarse simultáneamente las pautas genealógicas superimpuestas de miles de familias génicas (una de ellas, la constituida por los genes del ARNr).

Si no se hubiera producido nunca transferencia lateral, los árboles génicos presentarían la misma topología (igual orden de ramificación); los genes ancestrales de la raíz de cada árbol se hallarían en el genoma del último antepasado universal, la célula primitiva. Pero si apelamos a una transferencia fluida, la historia tuvo que ser muy otra. Diferirán los árboles de los genes, aunque algunos perfilen regiones de topología similar; *además*, no habrá en ningún caso una célula que pudiera reputarse el último antepasado común.

Como Woese adelantó, el antepasado ancestral no fue un organismo particular, un linaje exclusivo. Se trató, por contra, de un conglomerado diverso, de escasa consistencia interna, de células primitivas que evolucionaron al unísono hasta alcanzar un estadio en que los lazos terminaron por cortarse y se formaron comunidades distintas, que a su vez terminaron por conformar tres líneas de descendencia (*Bacteria*, *Archaea* y *Eukarya*). En otras palabras, las células primitivas, que contenían pocos genes, tomaron caminos muy dispares en su divergencia. Mediante el intercambio de genes transaccionaron con las facultades de unos y otros. Andando el tiempo, ese tropel de células eclécticas y cambiantes se fundieron en los tres dominios básicos que conocemos hoy. Dominios que distinguimos merced a la transferencia génica: la mayor parte de la misma, si no toda, se produce en su seno.

Creen algunos biólogos que por este camino sólo podemos llegar a la confusión y al desánimo. Como si nos confesáramos incapaces de tomar el testigo de Darwin y recrear la estructura del árbol de la vida. Pero la ciencia tiene sus reglas. Un modelo o hipótesis atractiva —la del árbol único— sugirió una serie de experimentos, en este caso la obtención de secuencias génicas y su análisis en el marco de la filogenia molecular. Los datos demuestran que este modelo es demasiado simple. Ahora se necesitan nuevas hipótesis cuyas implicaciones finales ni tan siquiera atisbamos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE UNIVERSAL ANCESTOR. Carl Woese en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volumen 95, n.º 12, páginas 6854-6859; 9 de junio de 1998.

YOU ARE WHAT YOU EAT: A GENE TRANSFER RACHET COULD ACCOUNT FOR BACTERIAL GENES IN EUKARYOTIC NUCLEAR GENOMES. W. Ford Doolittle en *Trends in Genetics*, vol. 14, n.º 8, páginas 307-311; agosto de 1998.

PHYLOGENETIC CLASSIFICATION AND THE UNIVERSAL TREE. W. Ford Doolitle en *Science*, volumen 284, páginas 2124-2128; 25 de junio de 1999.

Steve Mirsky

NEIL DEGRASSE TYSON: Cuando el cielo no es el límite

Pablo Neruda resumía en una frase su pensamiento sobre el destino; para el poeta chileno, todo encuentro fortuito era una cita. Neil deGrasse Tyson, astrofísico, comparte esa idea que lo mismo aplica a la evolución galáctica que al camino por donde le ha llevado la vida hasta su puesto actual, director del planetario Hayden del Museo Americano de Historia Natural. Tyson, de 41 años, ha sido el alma de la recreación de esa institución neoyorquina. Ha puesto el universo y el cielo nocturno al alcance de los vecinos.

Una mirada estrictamente determinista nos llevaría a un retrato esquemático y desfigurado de la trayectoria de Tyson, ese chico del Bronx que las noches despejadas subía a la azotea de los apartamentos Skyview para contemplar el firmamento. La azotea tenía su intríngulis. Estaba en quinto curso cuando el universo se le vino encima, según cuenta en sus memorias, *The Sky Is Not the Limit: Adventures of an Urban Astrophysicist*.

"Tenía un amigo —recuerda Tyson— que se había hecho con unos prismáticos. Y me invitó a echar un vistazo con ellos, algo nuevo para mí. Estaba seguro de que si miraba con ellos a la Luna, la vería mayor. Para mi sorpresa, la percibía, además, mucho mejor: lo que antes era un cuerpo gris y sombrío se convirtió en un mundo real, con sus montañas y valles, sus cráteres y sombras. Quedé prendado para siempre."

Si bien, indica rápidamente, "el solo interés no te lleva a ninguna parte. Hay que mimarlo y alimentarlo". Devoró cuanta información sobre astronomía y astrofísica cayó en sus manos, actividad en la que contó con la ayuda de sus padres, de su madre especialmente. "Me gusta pensar en ella como mi astromamá", dice. "Siempre que necesitaba una lente o un libro, no paraba hasta conseguirlo." Comenzó a observar los satélites galileanos de Júpiter y los anillos de Saturno, a veces a costa de los deberes.



1. Comparte la música de las esferas con los visitantes del museo el director del planetario Hayden, Neil deGrasse Tyson

Para suerte suya se avecinaba otro encuentro nerudiano. El profesor de ciencias de sexto curso se dio cuenta de las aficiones astronómicas de Tyson y le pasó el anuncio de unos cursos nocturnos del Hayden para jóvenes. Sin haber cumplido la edad mínima exigida, se inscribió. "Me abrió los ojos al mostrarme que el estudio del universo es un trabajo profesional, bastante más exigente que una vocación de fin de semana." Vinieron otros cursos en el Hayden. Y él se inscribía.

Por fin pudo matricularse en el Instituto de Bachillerato Científico del Bronx. En esos años empezó a familiarizarse con *Scientific American*. Próximo a entrar en la Universidad, se fijaba en reseñas biográficas de los autores. "Me interesaba saber dónde se habían formado, en qué centros se habían doctorado." La biografía de David Schramm, quien escribió su primer artículo en *Scientific American* en 1974, le impresionó. "Ponía que [Schramm] practicaba la lucha grecorromana", recuerda. "Era una persona alta y fornida; creo que le llamaban Schrammbo. No estaba reñido el deporte y el ocio con todo un carrerón en astrofísica. Valoraba mucho ese contrapunto de los artículos."

Tyson continuó su educación en la Universidad de Harvard. Realizó el segundo ciclo en la de Texas en Austin, donde creó modelos teóricos de formación de estrellas en galaxias enanas. También se matriculó en un curso sobre relatividad, impartido por John Archibald Wheeler, en el que coincidió con Alice Young. Un encuentro que acabó en matrimonio, del que nació su hija Miranda. Tyson se trasladó entonces a la Universidad de Columbia para profundizar en la estructura y evolución del centro

de la Vía Láctea, el llamado bulbo galáctico.

Amante de la difusión pública de la ciencia, desde 1983 firma una columna en *Star Date*, boletín general del Observatorio McDonald de la Universidad de Texas en Austin. En ella, Tyson se esconde bajo el ropaje de un mítico Merlín (no el de la leyenda artúrica), que, nacido en la galaxia Andrómeda, vive entre nosotros desde la formación de la Tierra. El "forastero" explica con acierto y humor los problemas de la ciencia en diálogo frecuente con grandes pensadores del pasado.

A principios de los noventa, los responsables del Museo Americano de Historia Natural decidieron renovar el planetario Hayden, que había quedado hecho una antigualla en todos los sentidos. Tyson daba por entonces clases en la Universidad de Princeton y había unido su fama de astrónomo competente con la de expositor genial. "Y sonó el teléfono", resume.

Llegó al planetario en 1994, primero como director en funciones a partir de 1995, y director permanente desde 1996. No abandonó la docencia en Princeton y sigue escribiendo una columna mensual en *Natural History*, la gaceta del museo. "Entró en nuestro ámbito con la aureola de una extraordinaria capacidad para comunicar la ciencia", explica Ellen V. Futter, presidenta del museo. "Posee la frescura del que reanima o da cuerpo y expresividad a cuestiones y teorías complejas; no es que las haga accesibles, es que las torna fascinantes de verdad."

De lo más destacable del remozado Hayden es la perspectiva sin parangón del cielo nocturno que puede ofrecer. El planetario cuenta con un nuevo proyector Zeiss valorado en 4 millones de dólares, el Mark IX, fabricado a medida para este cometido. "Puede colocar en la bóveda estrellas cuyas imágenes son tan precisas, que son más pequeñas que la resolución del ojo humano", expone Tyson. "Eso significa que en la cúpula hay detalles que se le escapan a uno." Pero no es un brindis al sol. "Cualquiera puede ahora traer sus prismáticos al planetario y observar con ellos mejor que a simple vista."

El esfuerzo por la verosimilitud llevó a incluir el centelleo, ese parpadeo de las estrellas causado por la turbulencia atmosférica. Por encantador que resulte, el centelleo reduce la limpidez. Introducir esta característica implica, por tanto, gastar dinero en una técnica que dificulta la visibilidad. Pero Tyson va más allá, sabedor de la potencia pedagógica que entraña. "Se pueden poner las estrellas y encender algunas luces", dice, "y el visitante comienza con el mismo cielo que se ve desde las calles de Nueva York. Iniciamos luego un paseo hasta el campo: se empiezan a apagar las luces y a eliminar el centelleo. Hasta que se nos ofrece el cielo nocturno en toda su majestad tal como se ve desde una cumbre." Los visitantes también podrán abandonar la Tierra, desde sus asientos, y contemplar imágenes del resto del universo.



2. Un proyector Zeiss hecho a medida puede reproducir en el planetario el centelleo de las estrellas

Desde la calle, la cúpula se ve como la mitad superior de una esfera de 29 metros, confinada en un cubo de cristal. "Usamos esa esfera durante un paseo educativo en el que se compara el tamaño de las cosas del universo." El poeta y artista William Blake se imaginaba contemplar todo el mundo en un grano de arena y contener la infinitud en la palma de la mano. Contener el mundo en la palma de la mano es posible dentro de la esfera, donde un globo terráqueo del tamaño de una pelota de tenis ayuda a captar mejor lo que es el sistema solar. "A esa escala, Júpiter tiene poco menos de 6 metros de diámetro", apunta Tyson. "Y el Sol, el tamaño de la esfera. Uno puede ver y sentir cuánto mayor es el Sol que la Tierra. Viajamos después hasta las estrellas y las galaxias, para volver en la dirección opuesta que nos lleva hasta la química, hasta las moléculas, los átomos y la estructura atómica." El interior de la esfera recrea también los tres primeros minutos del universo, donde los asistentes pueden observar la gran explosión y la formación de los elementos ligeros.

Con el nuevo Hayden terminado, Tyson tendrá la oportunidad de volver a su primera llamada, la investigación que dejó aparcada durante las intensas etapas finales de la construcción del planetario. "Sigo interesado en la estructura de la galaxia —cuenta— y en lo que llamamos la cinética y la dinámica de la galaxia. Las estrellas no sólo tienen una cierta abundancia relativa de elementos pesados, sino que se mueven, además, en una cierta dirección." Esa información puede indicar cómo "continuará evolucionando, o a partir de qué ha evolucionado la galaxia". Tyson retomará esta investigación como conservador del nuevo departamento académico de astrofísica del Hayden, con otros dos investigadores en plantilla y otros más que en otoño comenzarán estancias posdoctorales. "En cierta medida estamos naciendo", dice, "con una infraestructura que sostendrá un programa de investigación científica." Aunque seguirá ocupando la plaza de director, Tyson sacará algo más de tiempo para la ciencia delegando algunas de sus tareas.

Disfruta y siente una particular responsabilidad de aparecer ante el público, ya desde que tuvo la experiencia de verse en televisión por primera vez. Durante su estancia en Columbia, los astrónomos detectaron enormes prominencias y erupciones en el Sol. Una cadena de noticias local llamó a la facultad, y le pidieron a Tyson que comentara las explosiones. Vio la grabación aquella tarde. "Me di cuenta de que era la primera vez que veía un negro en la televisión entrevistado por ser experto en algo que no guardaba ninguna relación con el deporte o el espectáculo. En ese momento me di cuenta de mi obligación de continuar siendo un experto cuando la prensa requiera algo sobre el universo, para acabar si es que se puede con los estereotipos." Gracias a su estudio del universo entero, Tyson ha sido llevado al encuentro nerudiano definitivo, a una cita consigo mismo.

Ciencia y sociedad

Ría de Vigo

Patrones de circulación del agua

Las rías son formaciones geológicas, valles fluviales hundidos, donde se mueven y mezclan aguas de origen continental con aguas oceánicas. En volumen dominan las oceánicas. El movimiento y la mezcla en el interior de la ría conforman la "circulación estuárica". Pero las rías no son estuarios, aunque en unas y otros el agua menos salada tiende a salir por superficie mientras que la más salada y densa circula por el fondo.

Rías y estuarios difieren en su morfología y en los agentes dinámicos que dominan la circulación. Los estuarios presentan una unión somera con el exterior; apenas profundizan más de 10 metros. Las rías alcanzan más de 50 metros de profundidad en la desembocadura.

En las rías, las secciones transversales al eje longitudinal forman una 'V'. Profundidad y anchura aumentan desde el río hasta el océano. La morfología de las rías permite un intercambio, continuo y libre, de masa de agua y energía con la plataforma. En los estuarios, por contra, sólo el régimen de mareas permite la entrada de agua oceánica; domina el flujo de agua dulce hacia el exterior.

En el comportamiento dinámico de las rías influyen el movimiento de rotación de la Tierra, el régimen de vientos y las descargas fluviales. Al igual que las masas de aire tienden a girar hacia su derecha en el hemisferio norte por hallarse en un sistema no inercial en rotación (efecto de Coriolis), las aguas que se mueven en las rías y plataforma tienden a desplazarse a su derecha.

Cuando los vientos procedentes del norte arrastran la capa superficial del mar, crean en la plataforma una corriente hacia el sur, pero el efecto de Coriolis la desvía a la derecha, hacía mar abierto, produciendo un vacío hidrostático en la costa y en las bocas de las rías, que se reemplaza por aguas profundas y por aguas continentales.

Por tanto, los vientos del norte activan la salida del agua de las rías; mantienen el tipo de circulación estuárica positiva; generan una rápida renovación con aguas profundas (frías, limpias y ricas en sales nutrientes) y favorecen en consecuencia el crecimiento del plancton. Los vientos del norte diluyen los aportes de agua vertidos desde el continente. A este proceso dinámico general se le conoce por afloramiento; acontece en las costas orientales de los océanos.

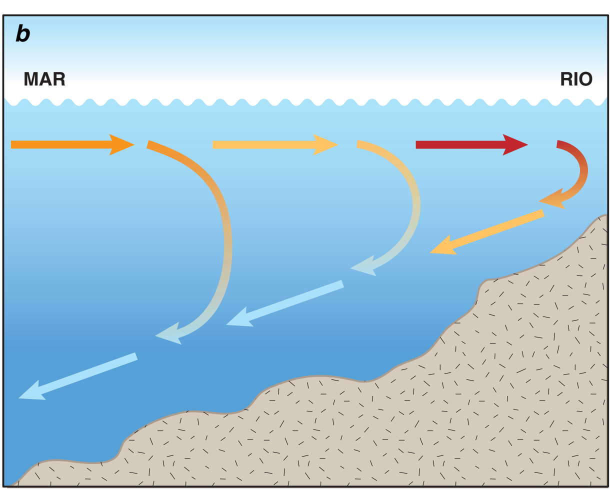
El proceso de hundimiento, su opuesto, ocurre cuando los vientos soplan del sur. Las aguas superficiales de la plataforma se agolpan contra la costa, al tiempo que circulan hacia al norte. Impiden así la salida normal del agua dulce, para convertirse en un freno contra la circulación estuárica positiva. La menor renovación de las aguas favorece un mayor calentamiento estival de las mismas, un empobrecimiento en nutrientes y una acumulación de las aguas vertidas desde la costa.

Cuando el hundimiento es muy intenso, por fuertes y persistente vientos del sur o por baja estabilidad de las aguas superficiales, se genera una inversión de la circulación estuárica, saliendo el agua ligeramente menos salada de las rías por el fondo. La productividad biológica del ecosistema decae, en tanto que aumenta el lavado de la ría con agua superficial oceánica. Este acoplamiento dinámico con la plataforma hace de la ría un ecosistema muy variable y afectado por el viento.

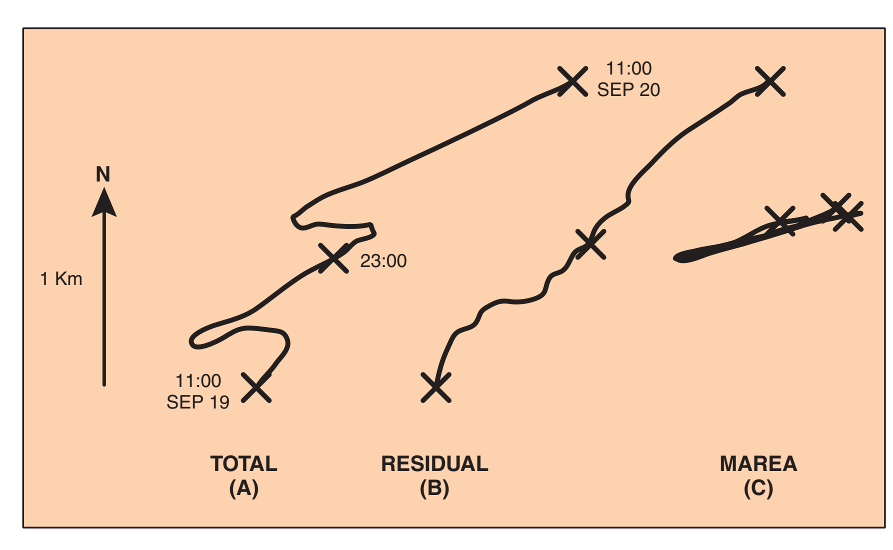
El efecto de Coriolis se refleja también en la circulación interior de las rías mediante la desviación y acumulación hacia la orilla norte que sufren las aguas menos saladas que salen hacia el exterior. En razón de ello, crecen los aportes costeros de las partes internas hacia la zona norte, mientras que los vertidos efectuados en los márgenes meridionales quedan inmovilizados o se extienden hacia el interior.

Otra peculiaridad morfológica de las rías es el río que les da nombre. Desemboca en su parte interior. Aporta un caudal de agua dulce, que varía entre 14 y 60 metros cúbicos por segundo.

Puesto que el gradiente vertical de salinidad de la plataforma contigua varía poco, la dilución con agua oceánica será más intensa en



1. Circulación estuárica positiva o normal (a). *Circulación estuárica inversa durante un fuerte período de hundimiento* (b)



2. Corriente total, residual y de marea en la ría de Vigo

las rías cuyos aportes de agua dulce sean mayores y más rápida, por tanto, su circulación estuárica. A este patrón dinámico se le denomina circulación estuárica; aquí, el caudal del río sería el agente dinámico dominante.

En la rías, el control dinámico dominante es el régimen de vientos con sus ciclos de afloramiento y hundimiento; el aporte del río se convierte en un perfecto trazador de la circulación. La peculiaridad de cada ría se basa en su geomorfología y en el caudal de agua aportado por los ríos. La ría gallega de Arosa, por ejemplo, tiene un carácter más oceánico por su mayor profundidad (60 metros), mientras que las de Muros y Pontevedra presentan un carácter más estuárico; la de Vigo ocupa un lugar intermedio.

Las rías experimentan la influencia de las mareas. Aunque su incidencia en el intercambio de agua es menor que la circulación estuárica modulada por el viento. A lo largo de un día, la marea produce un desplazamiento de dos ciclos de ida y vuelta a lo largo del eje longitudinal de la ría con un resultado neto prácticamente nulo.

Aunque en los márgenes costeros los aportes se mezclan y dispersan moderadamente por efecto del oleaje y de las mareas, este efecto, muy local, no produce una eliminación o dilución rápida de los efluentes. Pero la mezcla producida por las mareas favorece indirectamente el intercambio de agua entre las rías y la plataforma.

FÉLIX FERNÁNDEZ PÉREZ
Instituto de Investigaciones Marinas, Vigo

El hombre fábrica

Biotransformación enzimática

Muchos residuos generados en la industria son moléculas orgánicas de estructura compleja y aromática. En general, no se disuelven en agua. Por eso, dada su peligrosidad, se destruyen o se transforman para, en el mejor de los casos, aprovecharlos en otros ciclos químicos.

Proponemos una nueva vía, a saber, convertirlos en sustancias hidrosolubles mediante la biotransformación. En este supuesto, las moléculas, hechas solubles en agua, podrían eliminarse con el resto de los residuos. ¿Cómo realizar esa biotransformación?

El hombre lo ejecuta sin darse cuenta siempre que debe eliminar fármacos y otros xenobióticos, es decir, aditivos conservantes y colorantes de los alimentos manufacturados. Merced a enzimas que se encuentran en los microsomas hepáticos y en otros tejidos, transformamos moléculas orgánicas complejas en moléculas hidrosolubles. Las enzimas no rompen ni destruyen moléculas, sino que se limitan a “colgar” grupos funcionales (metilos, acetilos o hidroxilos) en los anillos aromáticos de las moléculas. De este modo, activadas las moléculas en reacciones de fase I, se llega a una segunda fase de transformación o conjugación con otros sustratos.

En la segunda fase, la molécula ha dejado de ser activa para devenir polar y, por tanto, excretable. Para ello atraviesa distintos procesos de acetilación, metilación y glucuronoconjugación. A veces, podemos incluso “fragmentar” la molécula en forma de N-desalquilación o hidrólisis. El resultado es una molécula distinta de la original, mucho más polar e hidrosoluble.

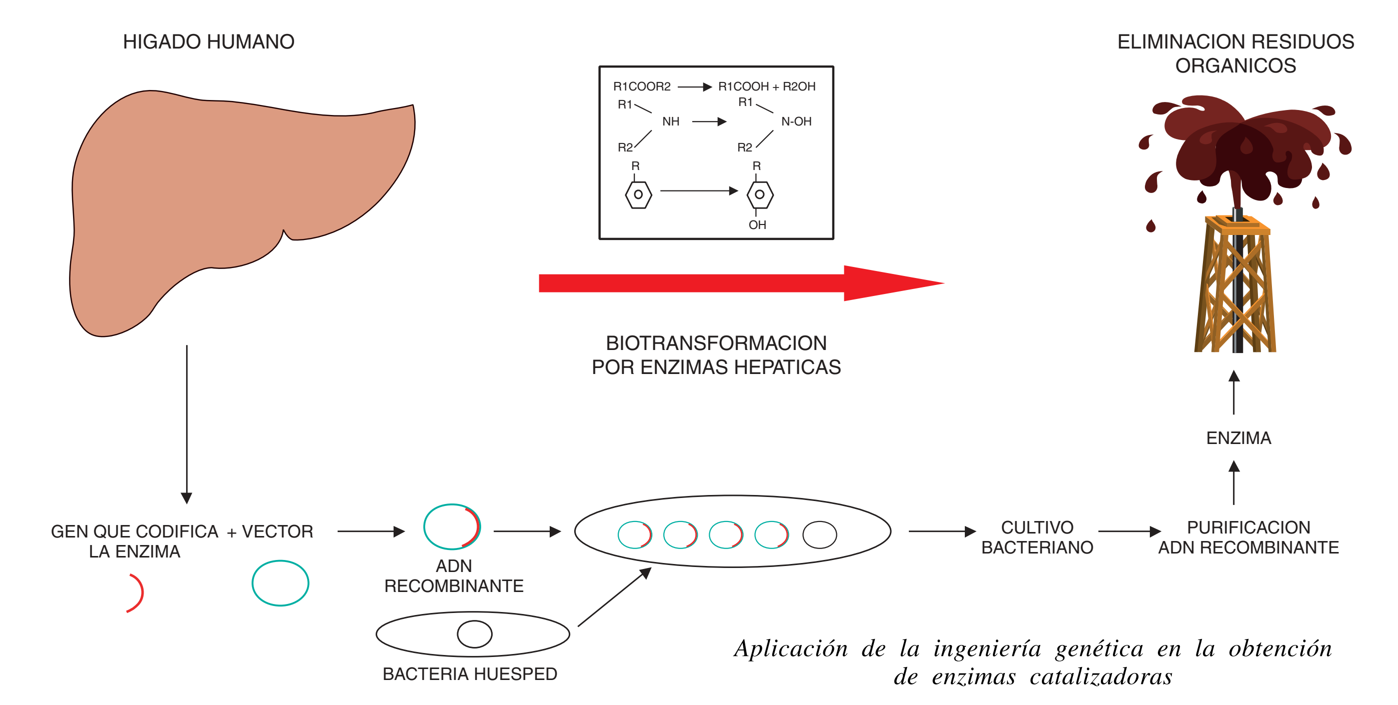
Entre las reacciones de fase I sobresalen la oxidación, reducción, desalquilación (o pérdida de cadenas carbonadas) e hidrólisis. Se desarrollan principalmente en los microsomas hepáticos con intervención de isoenzimas del citocromo p450. Este es el sistema enzimático que se emplea para metabolizar fármacos, sustancias endógenas y sustancias carcinógenas.

La hidrólisis es la reacción favorita del metabolismo de los fármacos en la fase I. Acontece en el plasma y metaboliza medicamentos que se encuentran en forma de ésteres o amidas. En la desalquilación, operada por oxidasas, se verifica una pérdida por escisión de la cadena carbonada. El organismo, remiso para las reacciones de reducción, lo hace sólo con grupos carbonilo, azo o nitro. Entre las enzimas implicadas, la monooxigenasa del citocromo p450 es una superfamilia de enzimas que catalizan reacciones de oxidación y reducción sobre un sustrato de naturaleza heterogénea.

La monooxigenasa del citocromo p450 está implicada en la hidroxilación, desalquilación, oxidación, desaminación, deshalogenación y desulfuración. ¿Qué precisan los sustratos para sufrir la agresión de este sistema? Una gran liposolubilidad. De las doce familias del gen del citocromo p450 identificadas, sólo tres (CYP1, CYP2 y CYP3) intervienen en la biotransformación de la mayoría de los fármacos.

Las esterasas y las amidasas son enzimas hidrolíticas que se encuentran repartidas en varios tejidos. De su reacción se obtienen grupos alcohol y amina aptos para su posterior conjugación. Las hidrolasas de epóxido microsómicas catalizan arenóxidos, mientras que las proteasas y peptidasa biotransforman xenobióticos de naturaleza polipeptídica.

Para desprenderse de un fármaco, el organismo lo etiqueta con una señal identificadora. Recurre a tres moléculas para conjugar en las reacciones de fase II: ácido glucurónico, glicocola o glicina y sulfatos. Estas moléculas se incorporan en el fármaco mediante la unión a sus grupos funcionales. Las glucuroniltransferasas unen una molécula de glucurónico a alcoholes,



Aplicación de la ingeniería genética en la obtención de enzimas catalizadoras

ácidos carboxílicos, aminas y grupos sulfhidrilo, mientras que las sultotransferasas transfieren azufre inorgánico a grupos alcohol.

A imitación de la propia naturaleza, sería lógico emplear el sistema de biotransformación microsómico hepático humano, capaz de reconocer un elevado número de substratos. Para producir una enzima hay que empezar por separar y aislar el gen responsable que cifra la secuencia aminoacídica. Luego se inserta el gen en el ADN de un vector (plásmido, virus o cósmido), para su incorporación en una bacteria y ulterior replicación. Se seleccionan las bacterias que contienen los vectores recombinantes deseados y se cultivan.

La industria puede emplear bacterias que producen la enzima sin cesar o bajo determinados estímulos. Puede también emplear directamente la enzima deseada, previo proceso de purificación y aislamiento. Una vez determinadas la actividad enzimática y las condiciones químicas de reacción, faltaría por comprobar su aplicación a gran escala y la valoración de sus ventajas e inconvenientes.

Se cuentan por toneladas los medicamentos que se consumen en el mundo. Al biotransformarse en hidrosolubles, tarde o temprano acabarán en las aguas residuales, una vez excretados del organismo. Si estos miles de "minilaboratorios" humanos trabajan diariamente generando miles de residuos hidrosolubles, ¿por qué un laboratorio no puede trabajar así? Al fin y al cabo, las cantidades de residuo generado podrían ser comparables a lo que producen los habitantes de una gran ciudad que consumen medicamentos y otros xenobióticos.

Pero no todos los productos biotransformados tendrían que verterse al medio ambiente, también podrían ser reutilizados o destruidos con mayor facilidad (y menor contaminación ambiental) al ser hidrosolubles.

Pero habrá que ponderar riesgos. ¿Qué puede pasar con las bacterias recombinantes? Podrían escapar al control y propagarse por el ambiente. Y no siempre los productos obtenidos serían los que deseamos. En el propio metabolismo humano se generan en ocasiones productos más tóxicos y peligrosos que la propia molécula original. Por no hablar de las limitaciones técnicas y económicas.

M.ª ASUNCIÓN PEIRÉ GARCÍA
CAP San Gervasio
Barcelona

Asteroides

Situación actual

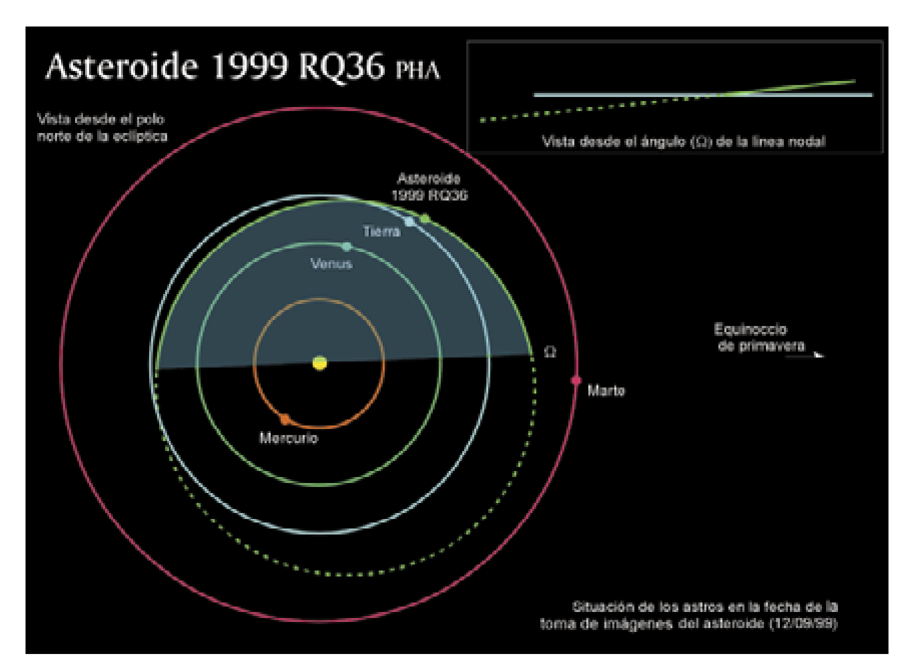
El estudio y descubrimiento de los cuerpos menores del sistema solar es una de las disciplinas de la astronomía moderna de mayor interés. Cuenta para ello con la rápida evolución del instrumental y el avance de la astronáutica.

El 1 de enero de 1801, Piazzi descubría el asteroide número 1: CERES. Siglo y medio después, Eugene Shoemaker atribuía al impacto de un asteroide el cráter Meteor de 1600 metros de diámetro, en Arizona.

Asteroides y cometas constituyen piezas fundamentales en la historia de la Tierra. La mayoría de los asteroides, restos de la formación del sistema solar interior, se localizan en el Cinturón Principal, situado entre Marte y Júpiter. Podemos clasificarlos en diferentes "familias" según sus características orbitales. Interesan principalmente los del tipo Apolo, Amor y Atenas, que ocasionalmente cruzan la órbita terrestre.

Se admite un bajo riesgo estadístico de colisión de un asteroide o cometa con la Tierra. Episodios como el ocurrido en Tunguska, que en 1908 aplastó una extensión siberiana equivalente a la isla de Mallorca, ocurren una vez cada siglo. Impactos como el del cráter Meteor de Arizona, que eyectó material en un radio de 10 kilómetros, suelen darse cada 50.000 años. Y eventos de alcance global, como el causante del cráter Chicxulub en Yucatán, que provocó una extinción en masa hace 65 millones, no se repiten en millones de años.

En 1993, el núcleo del cometa Shoemaker-Levy9 se rompió en varios fragmentos por la acción gravitatoria de Júpiter. Este hecho modificó su órbita, llevándole a chocar con el planeta en julio de 1994, liberando una cantidad de energía que nadie se atrevió a pronosticar. El interés excitado por la colisión del cometa



*1. Orbita del asteroide **1999RQ36**, de 300 metros de diámetro. Descubierto el 11 de septiembre de 1999 por el telescopio LINEAR de la fuerza aérea de EE.UU., se le considera potencialmente peligroso*

despertó una corriente de opinión en pro de la prevención, que promovió la inversión en programas de descubrimiento y seguimiento de objetos cercanos a la Tierra (NEO), como el *Spacewacht*, NEAT o LINEAR, este último de origen militar.

En 1996 se creó la Fundación para la Vigilancia Espacial, cuyo fin es aunar esfuerzos y potenciar los programas y acciones encaminados al descubrimiento de objetos que se acerquen a la Tierra (NEO). A través de un Nodo Central de Vigilancia Espacial (SCN), se coordinan los centros y establecen las prioridades.

En la misma línea, la resolución del 26 de marzo de 1996, adoptada por la Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa, reconocía explícitamente la amenaza potencial de los NEO y recomendaba apoyar los programas de detección y seguimiento.

Brian G. Marsden, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, vigila y calcula con su equipo de la Unión Astronómica Internacional las órbitas de los cuerpos menores del sistema solar. Según sus estimaciones, al ritmo actual de detección de objetos NEO se tardará más de 30 años en catalogar el 95 % de la población de asteroides de más de 1 km de diámetro potencialmente peligrosos.

Las estimaciones más realistas cifran en 2500 el número de asteroides de un kilómetro aproximado de diámetro que cruzan la órbita terrestre, en unos 10.000 los de 500 m, y en casi 300.000 los incluidos en el rango de 100 m. De todos ellos, sólo se han descubierto algo más de un 5 %, excluidos los cometas, que se detectan cuando ya se encuentran más cerca que la órbita de Júpiter. Los cometas representan el 20 % de la amenaza potencial.

La barrera del 5 % quedará pronto olvidada con la proliferación y puesta en marcha de equipos observacionales de telescopios en el rango de 0,4-0,8 m de diámetro, con sensores CCD de gran formato, alto rendimiento cuántico y programas informáticos de detección refinados. Esta combinación permitiría trabajar al límite de magnitud 20, ayudando a reducir el tiempo necesario para descubrir y catalogar los asteroides y cometas del tipo NEO a partir de 1 km de diámetro.

SALVADOR SÁNCHEZ MARTÍNEZ
Observatorio Astronómico de Mallorca,
Costitx-Mallorca



*2. Movimiento sobre el fondo estelar del asteroide del tipo Apolo, **1999RQ36**. Las cinco imágenes de la composición fueron tomadas por Juan Rodríguez y Salvador Sánchez, del equipo de observación del Observatorio Astronómico de Mallorca el 12 de septiembre de 1999*

Exposición al radón

Teoría y práctica

En el siglo XVI, los mineros del carbón de Bohemia caían a menudo enfermos, víctimas del “Bergkrankheit” o “mal de montaña”. Se tardó centurias en identificar y localizar el origen de esta patología mortal: un cáncer pulmonar relacionado con el radón, ^{222}Rn.

Este gas noble, descubierto por Ernst Dorn a comienzos del siglo XX en un “gas emanado del radio”, proviene de las cadenas naturales de desintegración. Decenios más tarde se hallaría que la alta incidencia del cáncer pulmonar en los mineros no la producía directamente el radón, sino sus descendientes sólidos de corto período de semidesintegración.

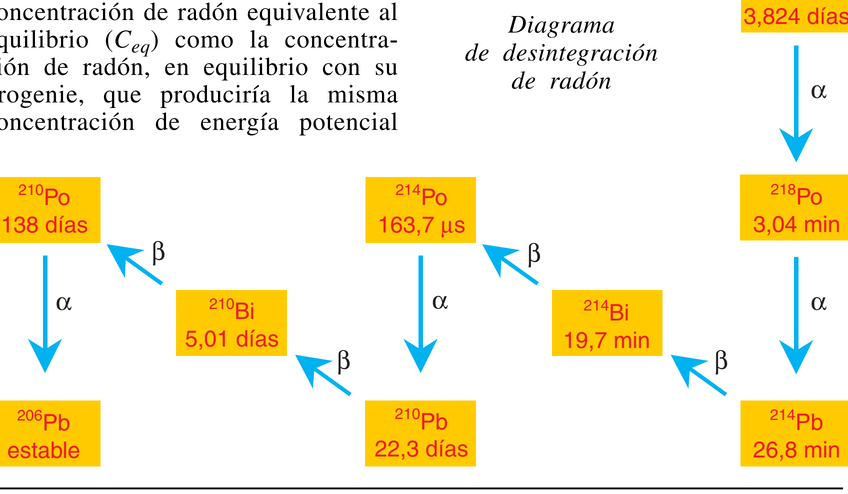
Cuando el radón llega a la atmósfera exterior se difunde. Pero se acumula en recintos cerrados, donde puede

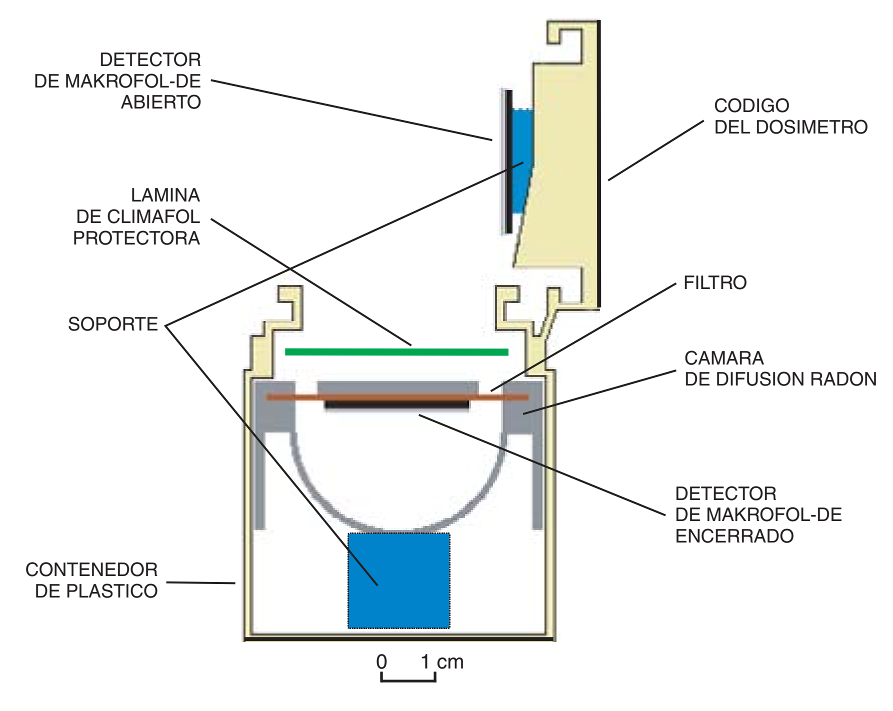
alcanzar una concentración bastante alta. Esa es la razón del riesgo doméstico o laboral de cáncer pulmonar de quienes viven expuestos a ese gas inerte. Según estimaciones efectuadas por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Ionizantes, recogidas en el informe de 1993, más del 55 % de la dosis efectiva debida a fuentes naturales de radiación se atribuía a los descendientes de vida media corta de radón.

Los productos de desintegración del radón interaccionan con átomos y aerosoles del aire. En un recinto cerrado, la ventilación y la deposición en superficie impiden que esos descendientes lleguen a una situación de equilibrio radiactivo con su progenitor. Por ese motivo se define la concentración de radón equivalente al equilibrio (C_{eq}) como la concentración de radón, en equilibrio con su progenie, que produciría la misma concentración de energía potencial alfa que la de los descendientes de radón existentes en el aire. Para hallar el valor de tal concentración se recurre a una expresión sencilla: $C_{eq} = 0{,}104\ C_1 + 0{,}516\ C_2 + 0{,}380\ C_{3/4}$, donde C_1, C_2 y $C_{3/4}$ son las concentraciones del ^{218}Po, ^{214}Pb y ^{214}Bi/^{214}Po, respectivamente.

La energía potencial alfa de un descendiente es la suma de las energías de las partículas alfa emitidas durante su desintegración hasta llegar al radionúclido ^{210}Pb. El estado de equilibrio entre el radón y sus descendientes se caracteriza mediante el factor de equilibrio (F), cociente entre la concentración de radón equivalente al equilibrio y su concentración real, C_0.

Diagrama de desintegración de radón





Esquema del medidor utilizado para la determinación del factor de equilibrio

Una vez se conoce C_{eq} se aplica un factor de conversión conveniente para estimar la dosis equivalente recibida. Los métodos utilizados en la dosimetría del radón y sus descendientes se basan en detectores activos, pasivos o ambos.

Las concentraciones de radón y su progenie en la atmósfera de un recinto cerrado varían en función de las características del edificio, ubicación del mismo y los hábitos de vida de sus ocupantes. Por ello, si se quiere estimar la dosis anual recibida por la población, conviene tomar medidas de dichas concentraciones durante un período largo, de dos a seis meses. Conocido el valor del factor de equilibrio, se calcula C_{eq} a partir de la concentración de radón media anual.

Los sistemas activos son muy útiles, si se pretende obtener un valor concreto del factor de equilibrio o analizar su evolución temporal. Sin embargo, cuando se quiere conocer el valor medio anual de F en una muestra significativa de recintos cerrados, resultan más apropiados los “detectores sólidos de trazas nucleares” (DSTN) y otros sistemas pasivos integradores. Los DSTN se basan en la traza latente, daño submicroscópico permanente producido al incidir sobre ellos una partícula cargada pesada.

Una vez expuestos los detectores en los recintos cerrados, se les aplica un revelado químico o electroquímico, optimizados de antemano para poner de manifiesto las trazas producidas por las partículas alfa de un rango de energía determinado. El recuento de las trazas se realiza a mano, mediante un lector de microfichas de pocos aumentos, o de forma semiautomática, mediante un analizador de imágenes.

En nuestro laboratorio se ha adaptado un medidor pasivo basado en la exposición al mismo tiempo de un DSTN, Makrofol-DE, encerrado dentro de una cámara de difusión para determinar la concentración de radón, y otro, abierto, en contacto directo con el aire, para obtener la concentración del ^{214}Po en el aire. El factor de equilibrio se determina a partir del cociente entre esta concentración y la deducida con el detector encerrado. La calibración de los DSTN se ha llevado a cabo en el Centro Nacional de Protección Radiológica de Chilton.

De los valores obtenidos en una campaña preliminar en la zona de Barcelona, se desprende que el valor medio anual del factor de equilibrio es del mismo orden de magnitud que el promedio mundial fijado por la Comisión Internacional de Protección

Radióloga, es decir, $F = 0{,}4$, aunque su rango de variación resalta la importancia de determinar su valor de forma individual para cada recinto cerrado.

CARMEN BAIXERAS,
KHALIL AMGAROU y LLUÍS FONT
Grupo de Física de las Radiaciones.
Universidad Autónoma de Barcelona

Polen y alergias

Ejemplo arquetípico

Por muchas razones es Sevilla. Por la diversidad de la flora, la primera. Sevilla se encuentra situada a 37º de latitud Norte. La zona posee un clima mediterráneo con inviernos suaves y una estación seca entre mayo y septiembre. La temperatura media anual es de 18,8 ºC. Las precipitaciones totales anuales medias son de 600 mm, aunque éstas se reparten de forma irregular con períodos recurrentes de sequía.

La vegetación que influye en el contenido polínico del aire de la ciudad está compuesta por una densa y variada flora ornamental (Cupresáceas, Moráceas, Ulmáceas, Salicáceas, Platanáceas, Oleáceas), cultivos arbóreos y herbáceos (olivar, cítricos, cereales, girasol), bosque autóctono de encinas y alcornoques, que se puede encontrar en buen estado de conservación o parcialmente sustituido por matorral de carácter serial (Ericáceas, Cistáceas, Labiadas, Papilionáceas), vegetación halófita (Quenopodiáceas) abundante en las marismas, extensiones variables de pinares y eucaliptales, representantes nitrófilos inherentes a todo asentamiento humano (Urticáceas, Compuestas, Crucíferas, Gramíneas) y algunos bosques en galerías (alisos, fresnos, sauces, chopos).

Las alergias más frecuentes registradas en la ciudad son las causadas por el polen de gramíneas, olivo, cenizos, llantenes, artemisia, fresno, sauces y plátano de sombra.

Desde 1987 viene estudiándose el espectro polínico de la ciudad. En total se han identificado 72 tipos polínicos diferentes, con una representación superior al 0,01 % en el polen total recogido. Los tipos cuantitativamente más importantes son: *Quercus* (19,58 %), *Olea europaea* (18,39 %), Cupresáceas (11,17 %), Gramíneas (11 %), *Platanus* (8,42 %) y Urticáceas (6,35 %). Se trata de valores promedio que varían a lo largo de los años, como consecuencia de la diferente meteorología, acciones humanas sobre el entorno (introducción o sustitución de nuevas especies, talas, incendios) o de factores endógenos de las propias plantas, que, como en el caso del olivo, se concretan en ritmos bienales de producción y emisión polínicas. El 30 % del polen total tiene su origen en la flora ornamental.

En enero y febrero, predomina el polen de Urticáceas y Cupresáceas, con cantidades menores de aliso, fresno, mercurial o gramíneas. Domina en marzo el polen de árboles, en particular la polinización breve e intensa del plátano de sombra. A final de mes se registran las mayores concentraciones de Urticáceas y Moráceas.

A comienzos de abril, se registran las concentraciones más altas de polen de encina y alcornoque. Empieza la emisión polínica del olivo (una de las más tempranas de la cuenca mediterránea). En primaveras con temperaturas medias cercanas a los 20 ºC y ausencia de precipitaciones, el olivo se caracteriza por un pico de altas concentraciones de unos 14 días de duración. En abril, también se producen los primeros picos de palmeras.

En mayo, aumentan las concentraciones polínicas de gramíneas. En Sevilla, existen 224 especies de gramíneas, con una floración escalonada a lo largo de todo el año, producto de las distintas características fenológicas de las especies: gramíneas de ciclo corto con floración precoz en invierno, gramíneas de ciclo largo, con fotosíntesis C3 y floración primaveral, y gramíneas con fotosíntesis C4, con ciclos acoplados a las altas temperaturas estivales. El resultado es la aparición del polen de gramíneas durante todas las semanas del año. El espectro polínico de Sevilla se completa con la presencia de polen de Quenopodiáceas y Amarantáceas, con numerosos representantes y períodos de floración muy prolongados, lo que se traduce en picos entre marzo y noviembre.

FRANCISCO J. GONZÁLEZ MINERO
PILAR CANDAU FERNÁNDEZ-MENSAQUE
Facultad de Farmacia de Sevilla

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y Sergio Rossi

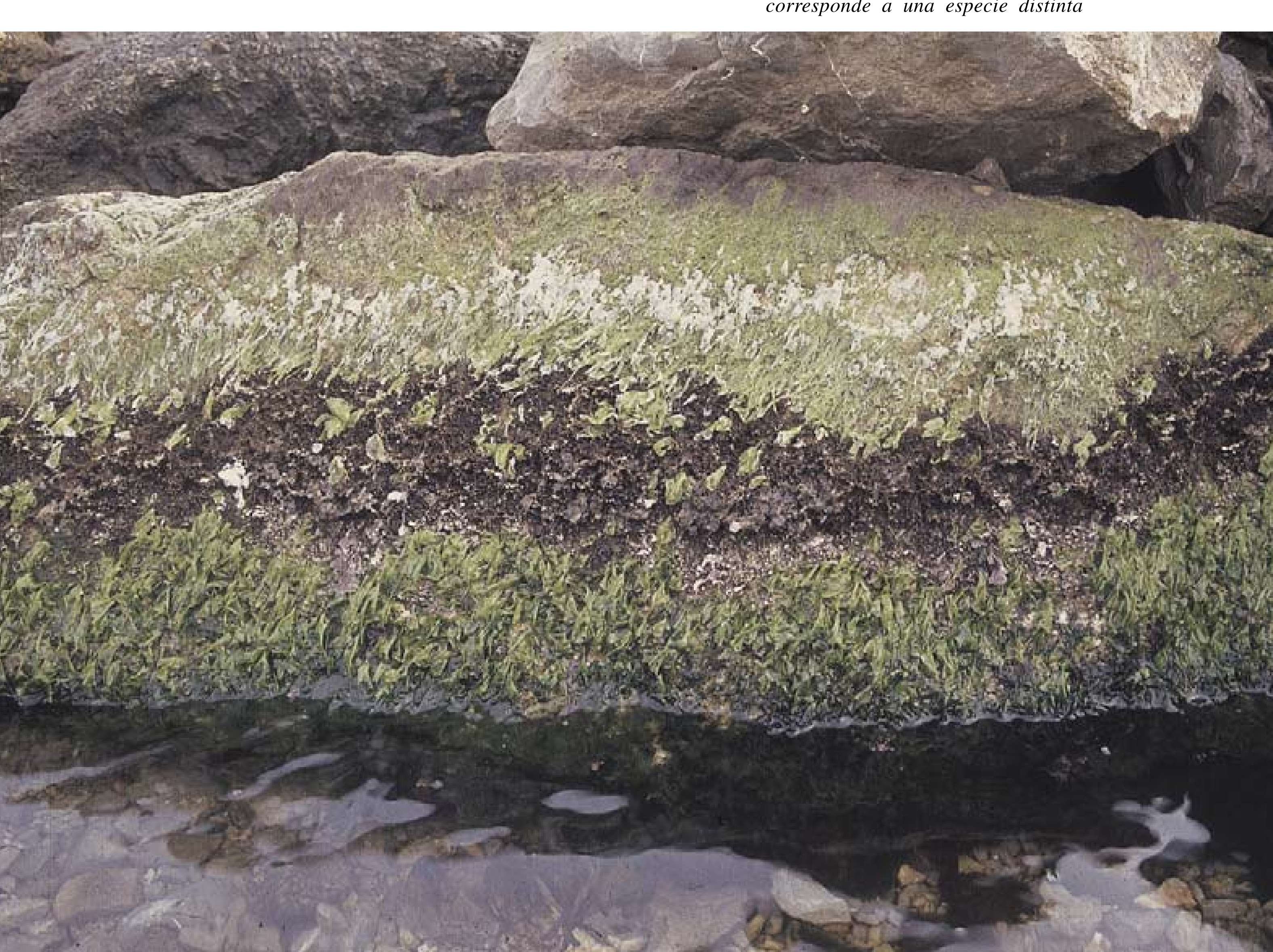
La vida en el límite

Por duras que sean las condiciones, apenas hay rincón de tierra o mar donde no haya puesto pie la vida. Pero existen determinados entornos, las zonas de frontera, donde se hacen más patentes las habilidades desarrolladas para sobrevivir en condiciones límite. Uno de esos enclaves es la interfase tierra-mar.

En la zona litoral, allí donde rompen las olas, se observan cinturones bien delimitados, cada uno de los cuales está dominado por una especie. Los cinturones responden a un gradiente de factores ambientales precisos, cuyos límites marcan la expansión de las especies. El grado de humedad, de sequedad y de temperatura son los principales factores limitantes.

Las especies que han colonizado esas rayas fronterizas han desarrollado una respuesta peculiar, desconocida en otros hábitats. En las zonas donde el oleaje permite una humectación continua, cerca de la superficie del mar, proliferan las algas del género *Cystoseira*. Por encima mismo se sitúan los crustáceos balánidos, cuyas valvas tenaces permiten que permanezcan retraídos, conservando un mínimo de humedad en su cavidad interna.

Paulatinamente se van perfilando cinturones de poblaciones monoespecíficas altamente especializadas. Un ejemplo son los moluscos del género *Littorina*. Se alimentan de líquenes, que son la manifestación extrema de la vida con poca humedad y elevada salinidad: medran en los cinturones más alejados del agua.



1. Cinturones de algas clorofíceas situados en zonas de moderado impacto del oleaje. Cada franja corresponde a una especie distinta



2. Cinturones en zonas muy batidas por el oleaje, dominadas por algas incrustantes (con esqueleto calcáreo) del género Lithophyllum. *Estas algas crean un excelente microhábitat para otras especies de pequeños crustáceos y poliquetos*



3. Población de molusco bivalvo perteneciente al género Mytillus. *Monopoliza casi todo el espacio disponible*



4. Población dominada por el crustáceo incrustante Chthamalus stellatus



5. Población de alga rodofícea del género Cystoseira. *Recubre de forma estacional los cinturones de otros organismos*



6. Aglomeración de individuos del género Littorina*, moluscos gasterópodos herbívoros*



DERRETIDO BAJO CERO

La finísima capa de agua que cubre la superficie del hielo explica fenómenos muy dispares, desde el deslizamiento de los patines hasta los rayos en las tormentas

John S. Wettlaufer y J. Greg Dash

Con el primer parte meteorológico del año que anuncia una ola de frío, los vecinos avisados comienzan a aislar las tuberías más vulnerables. Saben que, si evitan la congelación del agua en las cañerías, se ahorrarán el destrozo causado por el agua al solidificarse y expandirse. Muchos ignoran que así se están protegiendo, además, de una presión aún mayor, ejercida por la superficie del hielo que sigue siendo líquida.

La congelación del agua y la fusión del hielo se citan como ejemplos arquetípicos de cambios de fase. Hay, sin embargo, aspectos cruciales de esas transformaciones que vienen desconcertando, desde hace mucho, a los estudiosos. Algo se ha avanzado en los tres últimos lustros, con las respuestas ofrecidas por una finísima capa de agua, de espesor molecular.

Esa película cuasilíquida, un estado natural del hielo sólido creado por la "fusión superficial", posee características estructurales del sólido subyacente, pero mantiene la fluidez del líquido. Pese a su tamaño microscópico, la película desempeña un papel central en los principios básicos de la fusión y la congelación, sin desdeñar sus muchas consecuencias ambientales. Esa cubierta deslizante, que vale de conducto para el agua fluida y para la carga eléctrica, tiene el poder de levantar las piedras del suelo y provocar los relámpagos de las tormentas.

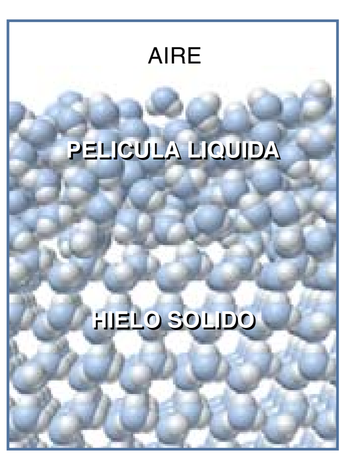
Bolas de nieve y patines de hielo

Cuando oímos hablar de "fusión superficial" lo primero que se nos viene a la mente es la imagen de un sólido que, con el calor, se va derritiendo desde la superficie. Un pedazo de mantequilla en un horno o de soldadura bajo el soplete empiezan a licuarse en la superficie, pues por fuera están más calientes que por dentro. Pero la fusión superficial se refiere en concreto a un fenómeno menos obvio: aunque el sólido se halle a la misma temperatura en el interior que en el exterior, se recubrirá con una capa delgada de su fase líquida, incluso varias decenas de grados por debajo del punto de fusión global.

Para entender la física de la fusión superficial, imaginémonos inmersos en un cristal de hielo. Allí las moléculas de agua adoptan el patrón fijo y repetido de una red rígida. Al desplazarnos del centro del cristal a la superficie, iremos encontrando periódicamente moléculas de agua, cada una coordinada con sus cuatro vecinas inmediatas. Pero a medida que nos acerquemos a la superficie, donde las moléculas exteriores del hielo están en contacto con el entorno desestructurado del aire circundante, observaremos que la red se distorsiona. Esas moléculas superficiales, más sueltas, presentan menos enlaces químicos que las mantengan en su sitio; vibran, pues, más violentamente que las interiores cuando la temperatura sube. Al adquirir ésta cierto valor, por debajo todavía del punto de fusión normal, empiezan a fluir en una capa similar a un líquido.

No es nueva la idea de que existe una película delgada líquida sobre la superficie del hielo. Durante muchos años se le atribuyó una causa errónea. Cualquiera que haya jugado en la nieve sabe que, para crear un proyectil eficaz, tiene que estar húmeda. Con la nieve seca no puede formarse un cuerpo consistente. Menos todavía si lo intentamos con un puñado de arena en la





MERCED a una película de agua los patinadores se deslizan sobre una superficie helada, incluso a temperaturas inferiores a la de congelación. Las moléculas de agua de los cristales de hielo pierden su rigidez cuando llegan al aire libre.

playa. René Descartes dejó por escrito en torno a 1635 sus observaciones sobre el motivo de la oposición del hielo a la disgregación. Unos doscientos años después, cavilaciones parecidas empujaron a Michael Faraday a estudiar durante veinte años la nieve y el hielo. "Cuando se aprieta nieve húmeda, se congela y forma un cuerpo (con agua en medio) que no se desmorona más que si lo hubiésemos realizado con tierra húmeda u otro tipo de materia", escribió en el otoño de 1842. Algunos fragmentos del diario de Faraday recogen las primeras investigaciones en torno a la fusión superficial. En su opinión, para que los copos de nieve se adhiriesen entre sí debía congelarse una capa delgada de agua que los recubría. Esa capa, concluía, es un fenómeno natural del hielo cuando está justo por debajo de su punto de fusión.

Faraday y John Tyndall realizaron, cada uno por su lado, experimentos que demostraron —al menos para ellos— la existencia de una película líquida sobre la superficie del hielo en equilibrio. Algunos contemporáneos suyos no quedaron convencidos. James Thompson y su hermano William (futuro Lord Kelvin) replicaron en 1849 que la fina capa de agua se debía sólo al descenso momentáneo del punto de fusión cuando un cuerpo en contacto con el hielo aumenta la presión sobre éste. Las moléculas están empaquetadas más prietamente en el agua que en el hielo; por tanto, cuando éste se comprime bajo la afilada cuchilla de un patín está un paso más cerca de su forma líquida.

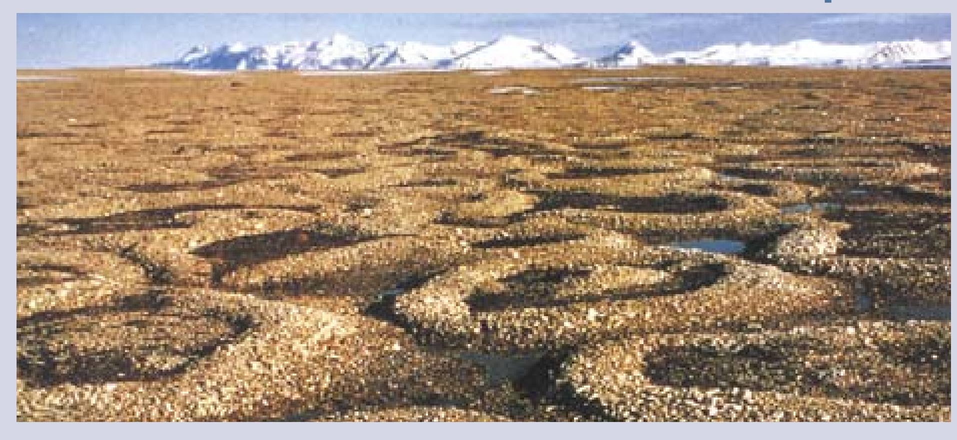
Este fenómeno, la fusión por presión, se convirtió en la explicación socorrida del comportamiento resbaladizo del hielo; lo repiten todavía muchos manuales. Un cálculo sencillo, sin embargo, muestra que la fusión por presión no puede explicar que una superficie helada sea deslizante, salvo a temperaturas cercanas al punto de fusión normal del hielo. Una persona que se desliza sobre un lago helado con unos patines de hielo hace que el punto de fusión del hielo descienda como mucho un par de grados. Por tanto, si la presión de fusión fuese el único factor a tener en cuenta, un patín se deslizaría sólo cuando la temperatura estuviera muy cerca de la de congelación, y ése no es precisamente el mejor momento para patinar sobre un lago cubierto de una fina capa de hielo. Para explicar tal discrepancia, en 1993 Frank P. Bowden y T. P. Hughes, de la Universidad de Cambridge, adujeron que a temperaturas inferiores predomina un factor distinto, a saber, el rozamiento entre el suelo y la cuchilla del patín, fricción que crea calor suficiente para formar una fina capa de agua.

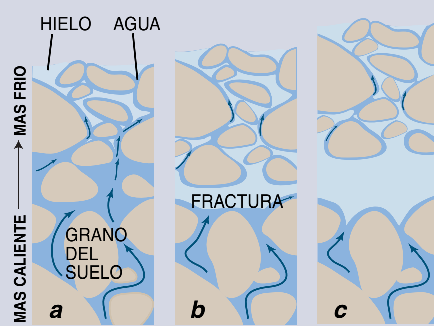
Tanto la fusión por presión como el calentamiento por fricción han atraído la atención de los físicos desde hace más de cien años. Ni una ni otro explican, sin embargo, por qué es tan difícil quedarse quieto sobre unos patines de hielo. Tampoco explican esas teorías la dinámica en que se basan el levantamiento por congelación o la electrización de las nubes de tormenta, dos efectos ambientales del hielo importantes. Para obtener respuestas completas volvimos a las observaciones que efectuó Faraday de la fusión superficial, fenómeno inherente a la generalidad de los sólidos.

Superficies húmedas

No sólo Faraday predijo la existencia de la fusión superficial. Otros abundaron en lo mismo, un siglo después, en el decenio de 1950. Pero hasta mediados de los años ochenta no se observó de verdad una capa microscópica de líquido sobre una superficie fundente. Joost M. W. Frenken y J. Friso van der Veen, del Instituto de Física Atómica y Molecular de Amsterdam, dirigieron en 1985 haces de iones contra un cristal de plomo que, mientras, iban calentando hasta cerca de su punto de fusión, 328 grados. De las trayectorias de los rebotes de los iones dedujeron que, a 318 grados, la red rígida de átomos de la superficie del cristal iniciaba su desorganización, cual átomos en un fluido. La película engrosaba gradualmente con la temperatura; al final el cristal se derretía desde la superficie hacia dentro. En 1986 Da-Ming Zhu, que preparaba su tesis de doctorado en la Universidad de Washington, y uno de nosotros (Dash) observamos que las películas de argón y neón sufren cambios graduales de fase por debajo de sus puntos de fusión normales. Con el tiempo se demos-

Efectos ambientales de la fusión superficial





1. EL LEVANTAMIENTO por congelación, que crea formaciones del estilo de estos círculos de piedras de la isla antártica de Spitzberg, empieza a producirse cuando se hiela el agua que empapa el suelo. El agua más caliente asciende a través de las películas líquidas que recubren el hielo (*a*). Cuando la presión del agua entre el hielo y los granos del suelo supera la del agua que entra, el suelo se fractura (*b*). Penetra agua y se congela, y en consecuencia el suelo se alza (*c*).

EL DURO, FRIO SUELO

Tras una helada otoñal los agricultores de regiones rocosas pueden encontrarse revueltos sus campos antes en orden: verán las piedras alzadas sobre pedestales de agujas de hielo y el suelo formando remolinos en torno a rocas mayores. Este fenómeno de levantamiento por congelación, auténtica pesadilla para la industria, daña la agricultura. Pese a manifestarse de manera tan espectacular, la fuerza le viene de las microscópicas películas líquidas de la superficie del hielo.

El levantamiento por congelación empieza a producirse cuando un aire a baja temperatura enfría el suelo y congela parte del agua cercana a la superficie del terreno; el peligro arrecia tras esa primera congelación. Las fuerzas moleculares y las impurezas existentes en las superficies heladas pueden impedir, a no ser que la temperatura caiga varias decenas de grados bajo cero, que esa mezcla de agua y hielo se congele hasta solidificarse del todo. Mientras no descienda tanto la temperatura, una película microscópica de agua recubrirá los cristales de hielo que se forman entre los fragmentos de roca y arcilla que componen el suelo.

El agua procedente de niveles más profundos alimenta el crecimiento de los cristales de hielo. Caliente posee más energía libre que fría. Como todos los compuestos, busca alcanzar el estado de menor energía libre. En la congelación de los suelos esta tendencia se traduce en la "presión termomolecular": el agua caliente se encamina a áreas donde pueda perder parte de su energía haciéndose hielo. Y el agua tiene incorporada oportunamente una vía para ese desplazamiento: la película líquida de la superficie del hielo.

El agua seguirá invadiendo los espacios entre los granos del suelo helado hasta que la presión creciente contrarreste allí la del agua que va entrando. Esta fuerza entre el hielo y los granos del suelo puede llegar a ser de unos 11 kilogramos por centímetro cuadrado por cada grado debajo de cero, hasta que el hielo se congela completamente. (Por mor de comparación, un gato hidráulico corriente de una estación de servicio necesita sólo 1,5 kilogramos por centímetro cuadrado para levantar un coche que pese algo menos de tonelada y media.) Lo más frecuente es que el suelo se fracture en subsuperficie mucho antes de que se alcance esa presión. El agua correrá entonces hacia los vacíos, donde se congelará y creará una capa sólida de hielo; a su vez, la capa se ensanchará conforme vaya fluyendo y helándose más agua, y levantará el suelo que hay encima.

Larry A. Wilen concibió no hace mucho en la Universidad de Washington un sencillo aparato gracias al cual hizo la primera medición directa de un proceso microscópico equivalente al levantamiento por congelación. Construyó una cámara con forma de moneda que encerraba un cristal de hielo rodeado de agua. Una cara de la cámara era una placa de vidrio, la otra una lámina de plástico. Entre cero y –1 grados se formó una película de agua donde el hielo tocaba el plástico.

Enfrió la superficie del disco, procurando que el centro fuera la parte más fría. El agua del borde del disco, más caliente y movida por la presión termomolecular resultante, fluyó hacia el centro del cristal de hielo a lo largo de la película líquida. Parte del agua se heló en el trayecto y alzó la cubierta de plástico, tal y como las crecientes capas de hielo subterráneo hacen con el suelo. Con Grae Worster, de la Universidad de Cambridge, desarrollamos después una teoría que explicaba el movimiento microscópico de esa película líquida que impulsa el levantamiento por congelación.

COLISIONES ELECTRIZANTES

En un cálido día de verano puede que soñemos con tiempos más fríos, con el hielo incluso. Y en ésas, al mismo tiempo que estalla un trueno, nos cae del cielo en

traría que apenas si hay un sólido que no experimente la fusión superficial.

El hielo no es excepción. Varios investigadores han sometido a observación su fusión superficial, pero las conclusiones acerca del espesor de la película y de su dependencia de la temperatura no siempre concuerdan. Puede que las diferencias partan de las dificultades que presenta la interpretación de resultados obtenidos con técnicas distintas. Los métodos ópticos, por ejemplo, registran la diferencia entre la densidad de la película líquida y la del hielo sólido en razón de su distinta reflexión de la luz. Otro procedimiento examina la estructura de la superficie cristalina midiendo la dispersión de los rayos X.

Un factor adicional que puede ensanchar la discrepancia entre los resultados de experimentos que usan un mismo instrumental es la gran sensibilidad de la película líquida a las impurezas disueltas en el agua. Las que aporta el aire, sobre todo sales y dióxido de carbono, pueden abrirse paso hasta el interior del instrumento y acumularse en las superficies heladas durante la congelación. Sólo estamos empezando a explorar su

JOHN S. WETTLAUFER y J. GREG DASH, físicos de la Universidad de Washington, colaboran en la investigación de los mecanismos en cuya virtud las superficies heladas y las transiciones de fase desencadenan fenómenos ambientales de gran alcance.

forma de granizo. También en el núcleo de la tormenta actúa el hielo; allí interviene en la generación de los rayos, uno de los fenómenos comunes más espectaculares. En un comienzo considerados fulminaciones de los dioses furiosos, terminaron por estimular las investigaciones sobre la naturaleza básica de la electricidad. Pero al final la clave de la producción de carga eléctrica en las nubes está en la microfísica del hielo. La electrización parte de la película líquida —de sólo unas moléculas de espesor— que recubre la superficie de los cristales de hielo aventados a través de las nubes.

Los rayos se originan en la base de la nube, donde hace el frío suficiente para congelar las gotitas de humedad. Esos cristalitos de hielo suben arrastrados por corrientes ascendentes y se aglomeran en pedazos de granizo, que caen a tierra. Al chocar, los cristales de hielo más pequeños tienden a rebotar hacia arriba con carga positiva, y dejan en el granizo que se precipita una carga negativa igual. Resultado de ello, las cargas positivas se acumulan cerca de la parte superior de la nube y las negativas próximas a la base.

Los investigadores obtuvieron esta información gracias a observaciones y simulaciones de laboratorio, pero se las han visto y deseado para comprender la cantidad o el signo de la carga eléctrica de las nubes. Greg J. Turner y C. David Stow, de la Universidad neozelandesa de Auckland, plantearon que las finas películas de agua que recubren las superficies de los cristales de hielo y de las piedras de granizo quizá tuviesen que ver con el proceso que carga la nube. Cinco años después, Marcia Baker y uno de nosotros (Dash) explicaron el posible mecanismo: la carga eléctrica es transportada por el agua que pasa de las piedras de granizo a los cristales de hielo cuando chocan.

Brian Mason sometió a prueba esa hipótesis en nuestro laboratorio mientras preparaba el doctorado, que completó en 1998. Pesó los granos de hielo antes y después de una colisión por medio de dos microbalanzas de cristal de cuarzo que detectan cambios de masa del orden de unas pocas diezmilmillonésimas de gramo (sensibilidad suficiente para apreciar la pequeñísima masa de unas cuantas capas de moléculas de agua). Midió también las corrientes eléctricas que fluían durante las colisiones para determinar si la carga se movía con la masa.

De acuerdo con lo predicho por Baker y Dash, la transferencia de masa iba siempre asociada a un movimiento de cargas. El cristal de hielo en formación —que ganaba una capa de agua con un espesor de escasos centenares de moléculas sobre un área de una centésima de milímetro cuadrado— adquiría, tras la colisión, una carga positiva.

Mason obtuvo un resultado sorprendente y significativo: la cantidad de masa transferida era mucho mayor de la que podía explicar la teoría de la fusión superficial, dependiente de la temperatura y del tamaño del cristal. Esta discordancia fue una de las pistas esenciales que nos llevaron a elaborar un modelo más riguroso de las colisiones que electrizan las nubes. El núcleo de nuestra teoría lo ocupa cierto mecanismo que refuerza la tendencia del hielo a licuarse, incluso por debajo de su punto de fusión: una colisión contundente puede dañar la red molecular sólida del hielo tanto, que se derretirá más líquido aunque esté diez grados o más por debajo de su punto de fusión. Las colisiones, junto con las impurezas, de dióxido de carbono por ejemplo, habituales en el hielo, aumentan el grosor de la película de agua. El grosor es importante porque libera más masa líquida y carga, que pueden entonces trasladarse de una superficie de hielo a otra.

La formación de un líquido tras un impacto de ese estilo libera además iones cargados negativamente que se habían acumulado cerca de la superficie del cristal del hielo en su proceso de crecimiento. En una colisión, cristales de hielo y granizo comparten una capa derretida, y los cristales en crecimiento pierden algunos iones negativos. De esta manera, sospechamos, las piedras de granizo que se precipitan atravesando la base de la nube van adquiriendo la carga negativa causante de los rayos.

Nuevos experimentos y cálculos pondrán a prueba estas ideas, pero parece que caben pocas dudas de que el mecanismo de generación de carga eléctrica que brinda las espectaculares exhibiciones de los rayos en la tormenta y las fuerzas que impulsan el levantamiento por congelación residen en una capa de agua de sólo unas moléculas de espesor.

—J.S.W. y J.G.D.

CRISTAL DE HIELO +

GRANIZO −

2. LOS RAYOS suelen originarse en la base de las nubes de tormenta, donde el granizo que cae acumula carga negativa al chocar contra los cristales de hielo arrastrados por la corriente ascendente.

influencia en la fusión superficial, pero los recientes trabajos teóricos de uno de nosotros (Wettlaufer) indican que las impurezas fomentan la fusión superficial. El hielo sólido rechaza las impurezas que se acumulan en las películas líquidas, porque no pueden insertarse en su red cristalina. Las sales disueltas, por ejemplo, pueden incrementar el grosor de la película haciendo que disminuyan tanto el punto de fusión del hielo como la energía libre del líquido.

Más de 150 años después de que Faraday atisbara la existencia de una fina capa líquida sobre el hielo, no estamos sino empezando a desentrañar los mecanismos físicos ocultos que hacen que el hielo sea resbaladizo, con propiedades adhesivas y poder destructor. Siguen abiertas muchas preguntas. Pero sabemos que si entendiésemos mejor la microfísica del hielo estaríamos más cerca de comprender a su vez los fenómenos ambientales que engendra. Indagar los orígenes moleculares del levantamiento por congelación y la electrización de las nubes son sólo dos de las vías de inquisición posibles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ICE PHYSICS AND THE NATURAL ENVIRONMENT. Dirigido por J. S. Wettlaufer, J. G. Dash y N. Untersteiner. NATO ASI Series I: Global Environmental Change, vol. 56. Springer-Verlag, 1999.

Referencias adicionales en la hoja web de Furio Ercolesi, http://www.sissa.it/cm/sp/course/refs.html.

Autismo precoz

La investigación reciente sobre las causas de esta enfermedad se centra en los genes que controlan el desarrollo del cerebro

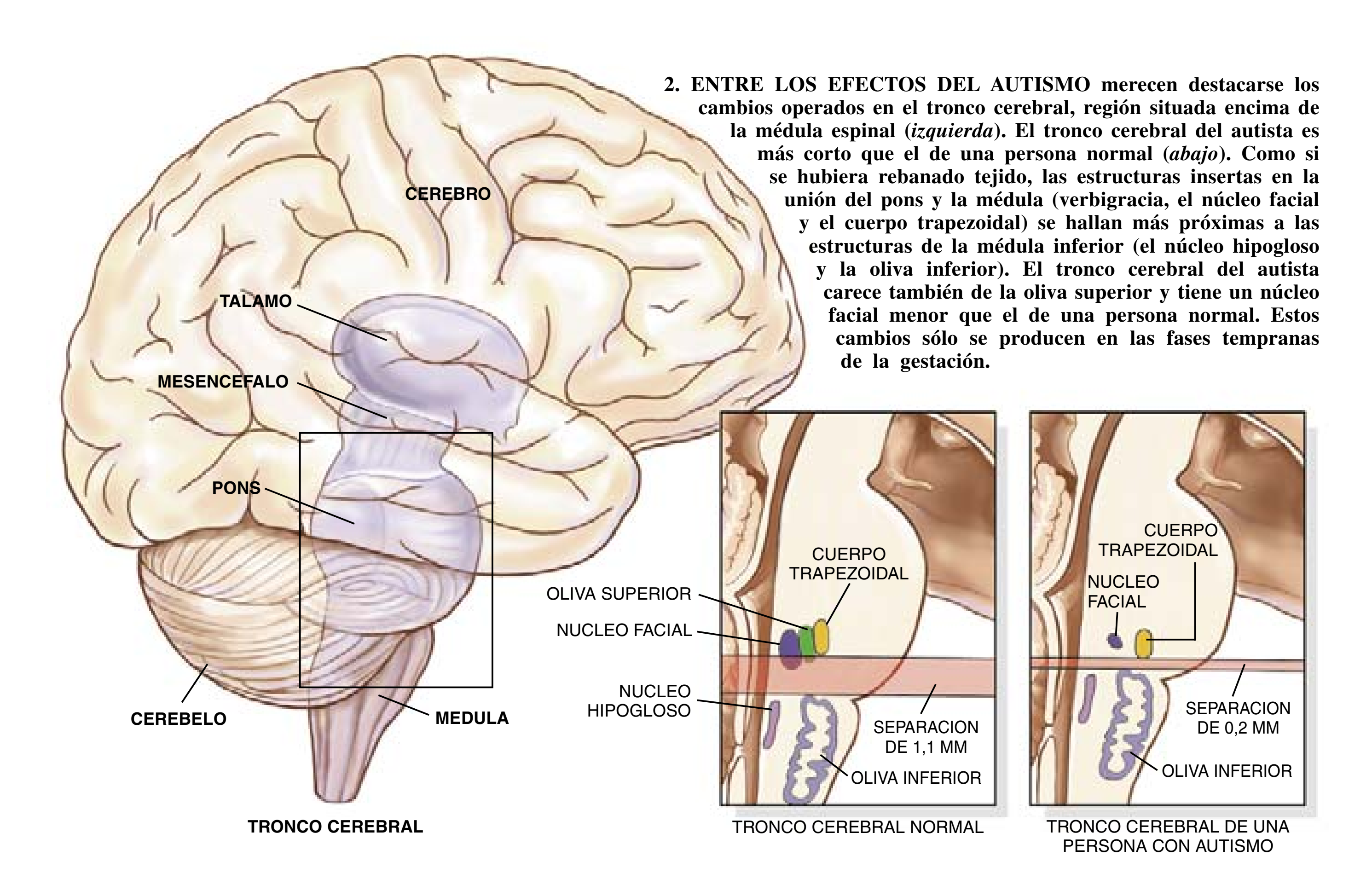
Patricia M. Rodier

Desde hace más de medio siglo la ciencia lucha por desentrañar el origen y la naturaleza del autismo, enfermedad del comportamiento muy compleja y caracterizada por síntomas diversos que suele manifestarse antes de que el niño haya cumplido los tres años. Los niños autistas se muestran incapaces de interpretar los estados emocionales de los otros; no reconocen la ira, ni la pena ni el engaño. Limitados en su capacidad de expresión oral, les cuesta iniciar o mantener una conversación. Se les ve a menudo obsesionados con un tema, actividad o gesto.

Estos comportamientos cerrados plantean problemas preocupantes. ¿Cómo puede el niño estar en el aula, si es imposible convencerle de que deje de golpear su cabeza en el pupitre? ¿Cómo puede trabar amistad con otros si su único interés se centra, por ejemplo, en los calendarios? Cuando los niños autistas sufren, además, retraso mental —como ocurre en la mayoría de los casos— el pronóstico se agrava. Con una terapéutica intensa del comportamiento mejoran, pero los síntomas que presentan impiden que puedan vivir a su aire, aun cuando tengan un cociente intelectual normal.

1. NIÑO AUTISTA DE SIETE AÑOS. Intenta alcanzar una burbuja de jabón en el recreo del Instituto Eden de Princeton, centro especializado en la enseñanza de esos pacientes.





2. ENTRE LOS EFECTOS DEL AUTISMO merecen destacarse los cambios operados en el tronco cerebral, región situada encima de la médula espinal (*izquierda*). El tronco cerebral del autista es más corto que el de una persona normal (*abajo*). Como si se hubiera rebanado tejido, las estructuras insertas en la unión del pons y la médula (verbigracia, el núcleo facial y el cuerpo trapezoidal) se hallan más próximas a las estructuras de la médula inferior (el núcleo hipogloso y la oliva inferior). El tronco cerebral del autista carece también de la oliva superior y tiene un núcleo facial menor que el de una persona normal. Estos cambios sólo se producen en las fases tempranas de la gestación.

Mi interés por las causas del autismo es reciente. Empezó por puro azar. En mis estudios embriológicos había abordado diversos defectos del cerebro. Pero en 1994 asistí a una reunión científica sobre investigaciones en defectos innatos donde se presentó un estudio ejemplar. Dos especialistas en oftalmología pediátrica, Marylin T. Miller y Kerstin Strömland, describieron los resultados sorprendentes de un trabajo sobre problemas de motilidad ocular en víctimas de la talidomida, el fármaco de las náuseas matinales en las jóvenes embarazadas, desencadenante de una epidemia de defectos congénitos en los años sesenta. Los sujetos del estudio eran adultos que, en su etapa de gestación, habían estado expuestos al fármaco. Miller y Strömland aportaron una observación que se les había escapado a otros investigadores:

PATRICIA M. RODIER, profesora de obstetricia y ginecología en la Universidad de Rochester, ha dedicado muchos años al estudio de las lesiones del sistema nervioso embrionario. Preside un equipo multidisciplinar que investiga las causas genéticas y ambientales del autismo.

un 5 por ciento de las víctimas de la talidomida padecían autismo, con una frecuencia 30 veces superior a la habitual en el resto de la población general.

Al oír los resultados, noté como una revelación que excitó todo mi cuerpo. En el empeño por descubrir las causas del autismo, la investigación había venido insistiendo en la determinación del inicio de la patología. Se había centrado en los momentos tardíos de la gestación o en los inmediatos al alumbramiento para relacionarlos con el origen, aunque no se disponía de ningún dato que apoyase una u otra hipótesis. La relación con la talidomida introdujo de repente una luz nueva en el tema. Sugería que el autismo se origina en las primeras semanas del embarazo, cuando el cerebro del embrión y el resto de su sistema nervioso comienzan a desarrollarse. El trabajo de Miller y Strömland me convenció de que el misterio del autismo podría resolverse en cuestión de poco tiempo.

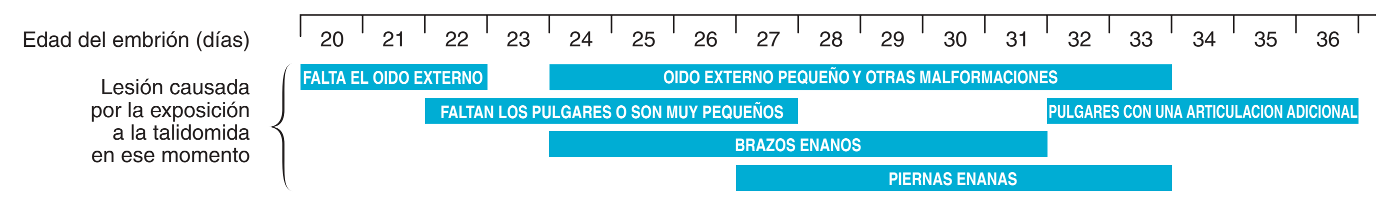
Factores genéticos

Dieciséis de cada 10.000 niños nacen con autismo o con alguna afección afín. Desde que se describió la enfermedad en 1943, se han dado grandes pasos en la definición de los síntomas, pero seguimos sin conocer sus bases biológicas, cuyo desentrañamiento permitiría identificar los factores de riesgo y diseñar nuevas terapias.

Con el examen de la herencia del autismo se ha demostrado que se presenta en familias, aunque no de una manera clara. Los hermanos de autistas tienen una probabilidad de un 3 a un 8 por ciento de padecer ellos la enfermedad. Es decir, una proporción superior al 0,16 por ciento que representa el riesgo en la población general. Aunque, también, proporción muy por debajo de la probabilidad del 50 por ciento, que caracterizaría a una enfermedad genética causada por una mutación dominante única (en que un gen defectuoso heredado de un solo progenitor basta para causar la afección), e incluso del 25 por ciento, que caracterizaría a una mutación recesiva única (en que una copia del gen defectuoso debe heredarse de cada progenitor).

Los resultados hereditarios encajan mejor dentro de los modelos que operan con variantes de genes diversos. Para complicar las cosas, los parientes de autistas pueden presentar algunos síntomas, aunque no el cuadro com-

Línea del tiempo de la talidomida



3. DEFECTOS INNATOS causados por la talidomida. Varían en razón del momento en que la madre estuvo expuesta al fármaco. Según un estudio de 1994, las víctimas talidomídicas con autismo mostraban anomalías del oído y extremidades normales, lo que sugiere que el fármaco desencadenó las alteraciones entre el día vigésimo y vigesimocuarto de gestación, cuando empieza a formarse el sistema nervioso.



pleto que justifique el diagnóstico de la enfermedad. Estos familiares podrían portar algunas variantes de los genes ligadas al autismo, sin llegar a la expresión plena de los factores genéticos.

Ciertos estudios de gemelos realizados en el Reino Unido confirman que el autismo tiene un componente hereditario, al par que sugieren la intervención complementaria del entorno. Si los factores fueran los únicos implicados, los gemelos monocigóticos (idénticos), que comparten los mismos genes, deberían tener también una probabilidad del 100 por ciento de coincidir en el diagnóstico. No sucede así. Cuando uno de los gemelos es autista, el otro sólo tiene una probabilidad del 60 por ciento de que se le diagnostique la misma afección. Ese segundo gemelo muestra, sin embargo, una probabilidad del 86 por ciento de desarrollar algunos de los síntomas del autismo. De las cifras se desprende la existencia de factores modificadores de la predisposición genética.

Embriología del autismo

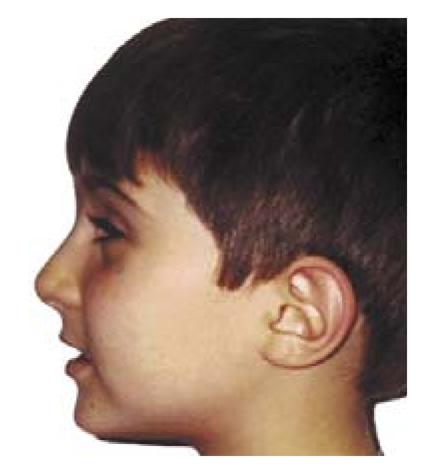
Se han identificado ya diversos factores de riesgo ambiental. La exposición en el útero a la rubéola o a compuestos causantes de defectos congénitos (el etanol o el ácido valproico, por ejemplo) aumenta la probabilidad de autismo. Mayor probabilidad presentan también los afectados por fenilcetonuria o esclerosis tuberosa, patologías genéticas. Pese a todo, ningún factor de ésos se persona con la suficiente frecuencia para atribuirle la responsabilidad exclusiva. Además, la mayoría de tales exposiciones a enfermedades o productos tóxicos afectarían por igual a los gemelos, a los dos. El entorno ha de participar de una manera mucho más sutil de lo descubierto hasta ahora. Se ignora por qué la combinación de factores induce en unos casos los síntomas y no en otros. Esa disparidad dificulta sobremanera la búsqueda de las causas del autismo.

En 1994 Miller y Strömland añadieron un nuevo factor ambiental: la exposición a la talidomida en el útero. Todas las personas del estudio —suecos adultos nacidos entre finales de los cincuenta y principios de los sesenta— presentaban algunas de las malformaciones que dieron triste fama a la talidomida. Brazos y piernas malformados, orejas y pulgares deformes, si no ausentes, y disfunciones neurológicas en ojos y músculos faciales. Por embriología sabemos qué órganos se desarrollan en cada etapa del embarazo; podemos, pues, señalar los días exactos en que se induce una malformación: se atenta contra el pulgar al vigesimosegundo día de la concepción, contra el oído externo entre el vigésimo y el trigésimo, contra brazos y piernas entre los días 25 y 35.

El estudio de Miller y Strömland resultaba para mí apasionante en un punto: la mayoría de las víctimas de la talidomida con autismo mostraban anomalías en las orejas, no así en brazos o piernas. Esa regularidad evidenciaba que habían padecido la agresión en una fase precoz de la gestación —entre 20 y 24 días después de la concepción— antes de que muchas madres supieran que estaban embarazadas.

No hay mejor pista para saber *qué* le pasó a un embrión que conocer *cuándo* pasó. En el caso del autismo inducido por talidomida, el período crítico es bastante más precoz que lo que se creía. Antes de la cuarta semana de gestación se forman muy pocas neuronas; además, en su mayoría son las motoras de los nervios craneales, que gobiernan los músculos





4. NIÑO AUTISTA de aspecto normal, al menos para el ojo inexperto. Tiene, sin embargo, varias anomalías características de la afección. Las comisuras de la boca, si las comparamos con el centro del labio superior, son bajas; la parte superior de las orejas está ligeramente abatida (*izquierda*). Las orejas se hallan por debajo de lo normal y su forma es casi cuadrada (*derecha*).

Elenco de trastornos del autismo

Para diagnosticarle autismo a un paciente se requiere que presente un comportamiento anormal en tres categorías (*véase la lista a la derecha*) y un déficit notable en capacidad de interacción social. Los clínicos han identificado otras afecciones que, si bien comparten rasgos con el autismo, muestran acentuados determinados síntomas o reforzados otros. Así, el trastorno difuso e inespecífico del desarrollo (PDD-NOS, del inglés “Pervasive Development Disorder, Not Otherwise Specified”) encaja en pacientes que no cumplen los criterios del autismo en alguna de las tres categorías. Igual que en el autismo, el PDD-NOS afecta a pacientes con toda la gama posible de cociente intelectual. El síndrome de Asperger se predica de pacientes con cociente intelectual normal y sin retrasos en el desarrollo del lenguaje. Dos diagnósticos mucho más infrecuentes son la afección desintegradora de la infancia, en la que a un desarrollo temprano normal sigue una regresión que desemboca en una incapacidad grave, y el síndrome de Rett, neuropatología progresiva que ocurre sólo en las mujeres.

Aunque es sabido desde hace tiempo que el autismo es una enfermedad hereditaria, la investigación reciente en grupos familiares acometida por el equipo de Peter Szatmari sugiere que es la gama de síntomas lo que aparece en familias y no un diagnóstico único. Dicho de otro modo, un hermano de un niño autista puede presentar síndrome de Asperger, o una mujer autista puede tener un sobrino con PDD-NOS. De esa línea de trabajo en familias se desprende que al menos tres de los diagnósticos —autismo, PDD-NOS y síndrome de Asperger— surgen en el marco de unos mismos factores heredados.

—P.M.R.





de los ojos, oído, cara, mandíbulas, garganta y lengua. El soma de estas neuronas se encuentra en el tronco cerebral, la región situada entre la médula y el resto del cerebro. Puesto que estas neuronas motoras se desarrollan al mismo tiempo que el oído externo, podría predecirse que las víctimas de la talidomida con autismo sufrirían también disfunciones de los nervios craneales. Miller y Strömland confirmaron la predicción; observaron que todos los sujetos autistas padecían anomalías en movimientos oculares, expresión facial o en ambos.

Por pura lógica había que preguntarse entonces si los casos de autismo debidos a la talidomida se parecían o no a aquellos otros cuya causa se desconocía. Salvo en su comportamiento, los autistas acostumbran tener un aspecto normal, incluso atractivo. También su talla es normal, con una cabeza entre normal y un poco grande.

Sin embargo, los escasos estudios que han analizado rasgos ajenos al comportamiento nos han revelado la existencia de anomalías físicas y nerviosas poco importantes, aunque idénticas a las vinculadas al autismo relacionado con la talidomida. Por ejemplo, ciertas malformaciones menores del oído externo —en particular la rotación posterior, con la zona superior de la oreja que se inclina hacia atrás más de 15 grados— se presentan más a menudo en niños autistas que en niños con un desarrollo normal, niños con retraso mental o hermanos de niños autistas. Las disfunciones de los movimientos oculares se habían asociado con el autismo antes del estudio de la talidomida. La ausencia de expresión facial constituye uno de los comportamientos utilizados para el diagnóstico de la enfermedad.

Neurobiología del autismo

¿Se debían a cambios de la función de los nervios craneales todos los síntomas del autismo? Probablemente no. Resultaba más verosímil que las disfunciones nerviosas de los autistas reflejasen una lesión precoz del cerebro que no sólo interesara los nervios craneales,

Categorías diagnósticas

Deterioro de la interacción social: Fallo en el uso del contacto visual, la expresión o los gestos que regulan la interacción social; fallo en la búsqueda del confort; fallo en el desarrollo de relaciones con los iguales.

Deterioro de la comunicación: Fallo en el uso del lenguaje hablado, sin la acción compensadora de los gestos; déficit en el inicio o mantenimiento de la conversación, pese a una correcta expresión oral; lenguaje aberrante (repetición de una pregunta en vez de contestar).

Intereses y comportamientos restringidos y repetitivos: Preocupación obsesiva por un tema o actividad; apuros ante un cambio; insistencia en acciones rutinarias sin sentido; movimientos repetitivos, como golpear o frotarse las manos.

EL TRATAMIENTO del comportamiento de los niños autistas puede facilitarles una vida adulta feliz. Los instructores del Instituto Eden valoran cuidadosamente los síntomas de cada niño y elaboran un plan de intervención adecuado. Se les estimula para que participen en actividades que requieren esfuerzo y atención (*izquierda*). El Instituto ofrece también alojamiento a adultos autistas (*derecha*). El varón de 37 años que aparece en la fotografía usó cintas de vídeo para hacer la cortina colgada detrás de la cama; su interés intenso en estos objetos es un comportamiento característico del autismo.

sino que produjera también efectos secundarios en fases más avanzadas del desarrollo cerebral. Es decir, la lesión del tronco cerebral podría entorpecer el desarrollo y tendido adecuado de redes nerviosas de otras regiones cerebrales, incluidas las que intervienen en funciones de nivel superior, como el habla, dando lugar a los síntomas de una conducta autista. O quizá las malformaciones del oído y las disfunciones de los nervios craneales fueran sólo efectos secundarios de una lesión oculta. Cualquiera que fuera la situación real, los trastornos de los autistas de causa desconocida eran bastante parecidas a las que presentaban las víctimas de talidomida con autismo. En conclusión, muchos casos de autismo, si no todos, se iniciaban en una fase precoz de la gestación.

A la región del cerebro afectada según el estudio de la talidomida —el tronco cerebral— se había prestado escasa atención en la investigación de daños congénitos del cerebro. No sólo del autismo. Solemos asociar el tronco cerebral con funciones básicas, desde la respiración hasta la deglución, pasando por el equilibrio, la coordinación motora y otros. Muchos aspectos del comportamiento alterados en el autismo —piénsese en el lenguaje, la planificación y la interpretación de claves sociales— están, así se supone, controlados por regiones superiores del cerebro, como la corteza cerebral y el hipocampo.

También parece que ciertos síntomas habituales en el autismo —falta de expresión facial, hipersensibilidad al tacto y al sonido, y trastornos del sueño— se originan en las regiones del cerebro asociadas con funciones básicas. Además, la alteración más frecuente del cerebro autista no es un cambio en el prosencéfalo, sino una reducción en el número de neuronas del cerebelo, un centro magno de procesamiento del postencéfalo con funciones importantes en el control del movimiento muscular.

La confusión reinante en torno a las regiones cerebrales implicadas en el autismo podría deberse a la falta de seguridad sobre el lugar donde se controlan las funciones. Así, el grupo dirigido por Eric Courchesne ha demostrado que se activan partes del cerebelo durante la realización de ciertas tareas que requieren un procesamiento cognitivo de alto nivel.

Otra dificultad reside en la propia complejidad de los síntomas del autismo. Si se pudiera comprobar el valor diagnóstico de algunas disfunciones elementales del comportamiento autista, avanzaríamos con paso más firme en la búsqueda del origen nervioso de las mismas.

En 1995 nuestro grupo prosiguió el estudio sobre la talidomida examinando el tronco encefálico de una autista. Las muestras de tejido procedían de la autopsia de una joven con autismo de causa desconocida; había fallecido en los años setenta, pero afortunadamente se conservaron muestras de tejido cerebral. Cuando examinamos el tronco encefálico, nos sorprendió la ausencia casi absoluta de dos estructuras: el núcleo facial, que controla los músculos de la expresión facial, y la oliva superior, que es una estación de relé de la información auditiva. Ambas estructuras surgen del mismo segmento del tubo neural del embrión, el órgano que originará el sistema nervioso central. Tras el recuento de las neuronas faciales vimos que sólo había 400, mientras que en un cerebro normal ascenderían a unas 9000.

En su conjunto el cerebro de la mujer tenía un tamaño normal; de hecho pesaba algo más que un cerebro medio. Planteé la hipótesis de que el tronco encefálico carecería sólo de las neuronas específicas ya identificadas, es decir, las del núcleo facial y la oliva superior. Para someter a prueba la idea, decidí medir las distancias entre varios puntos de referencia neuroanatómicos. Contradijo la hipótesis. Aunque de un lado al otro las medidas eran normales, las medidas anteroposteriores resultaban asombrosamente menores en el tronco cerebral de la joven autista. Era como si se le hubiese rebanado una banda de tejido y las dos piezas restantes se hubiesen unido sin dejar rastro del hueco.

Volví a sentir por segunda vez el chispazo de luz. Mi excitación no la había provocado un resultado inesperado, sino la clara conciencia de que había observado antes ese tipo de acortamiento, en un artículo donde aparecían fotografías de cerebros anormales de ratón.

Cuando localicé por fin el artículo, entre los montones de papeles apilados en el suelo de mi despacho, comprobé que la correspondencia entre el cerebro de la chica y los de los ratones que se describían en el artículo era más estrecha que lo que yo recordaba. En ambos casos se apreciaba un acortamiento del tronco encefálico, un núcleo facial menor de lo normal y la ausencia de una oliva superior. Otros rasgos de los ratones se relacionaban sin ambigüedad con anomalías asociadas al autismo; tenían malformaciones en el oído y carecían de una de las estructuras cerebrales que controlan el movimiento del ojo.

¿Qué era lo que había alterado el cerebro de los ratones? No fue la talidomida, ni ningún otro factor ambiental vinculado al autismo. Se había suprimido la función de un gen. Se trataba de ratones transgénicos “knockout”, en los que se había eliminado la expresión del gen *Hoxa1* con la intención de conocer el papel del mismo en los primeros momentos del desarrollo. ¿Nos hallábamos ante uno de los genes implicados en el autismo?”

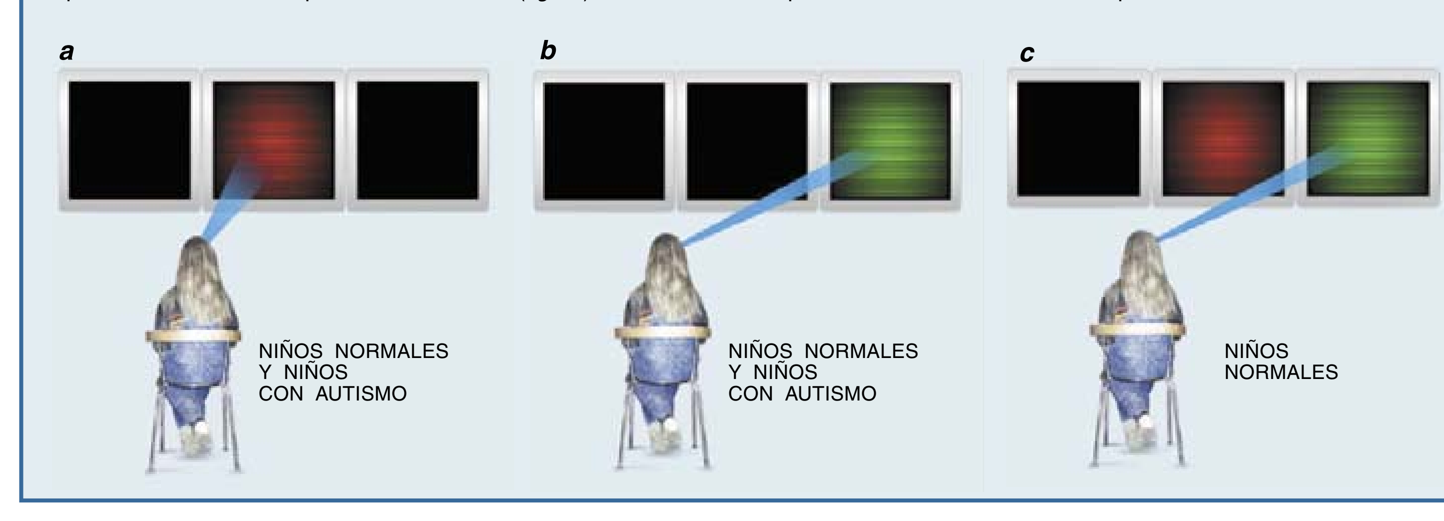
La bibliografía parecía respaldar esa vía de investigación en el autismo.

Un síntoma muy elemental de autismo

Expertos de la Universidad de York y el Hospital Pediátrico de Toronto han identificado un comportamiento relacionado con el autismo que resulta ser bastante más elemental que la ristra de conductas en que se ha venido apoyando el diagnóstico de la patología. Susan Bryson y Reginald Landry comprobaron que los niños autistas respondían de una forma anómala a una prueba en la que entraban en juego las reacciones ante estímulos visuales. Puesto que se trata de una actividad probablemente mediada por una parte primitiva del cerebro —el tronco cerebral, el cerebelo o ambos— el descubrimiento nos lleva a la neurobiología del autismo. El trabajo de Bryson y Landry indica a los clínicos un camino sencillo para diagnosticar esta enfermedad en los niños.

Observaron las reacciones de dos grupos de niños, unos autistas y otros exentos, mientras miraban las luces que se encendían en pantallas de vídeo (*figura*). La edad de los niños oscilaba entre los cuatro y siete años. En la primera prueba, se colocaba a cada niño frente a un panel de tres pantallas; a continuación aparecía una luz en la pantalla central. El estímulo provocaba que todos los niños centrasen su atención en el foco luminoso (*a*). Luego, se apagaba la pantalla central, y el foco luminoso aparecía en la pantalla de la derecha o de la izquierda. Ambos grupos de niños dirigían su mirada hacia la pantalla iluminada (*b*). En la segunda prueba, sin embargo, las luces de la pantalla central se mantenían encendidas mientras aparecían luces en una u otra de las pantallas laterales. Los niños exentos miraban el nuevo estímulo luminoso (*c*), pero los autistas seguían "pegados" al primer estímulo y no desviaban su atención hacia el nuevo (*d*). Estas dos pruebas se repitieron muchas veces con cada niño.

Bryson y Landry hallaron que los niños que padecían otro tipo de lesiones cerebrales eran perfectamente normales



El estudio sobre ratones "knockout" demostraba que el *Hoxa1* desempeñaba un papel central en el desarrollo del tronco cerebral. Laboratorios de Salt Lake City y Londres habían estudiado cepas diferentes de ratones "knockout" con resultados semejantes. Descubrieron que el gen operaba en el tronco cerebral cuando se formaban las primeras neuronas, esto es, en el mismo período al que Miller y Strömland atribuían la acción patógena autista de la talidomida. El gen *Hoxa1* determina un factor de transcripción, proteína que modula la actividad de otros genes. Además, el *Hoxa1* no interviene en ningún tejido después de la embriogénesis precoz. Si un gen persiste activo durante toda la vida, lo que es frecuente, su función alterada traerá problemas, que aumentarán con la edad del individuo. Pero un gen activo sólo durante el desarrollo constituye un candidato mejor para explicar una alteración congénita como el autismo, que parece permanecer estable después de la infancia.

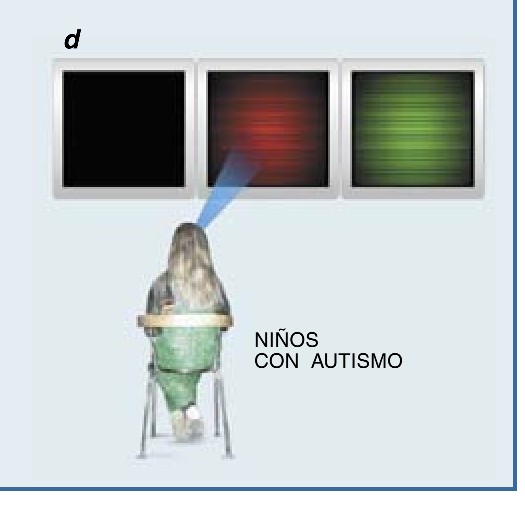
El *Hoxa1* es un gen "muy conservador", lo que significa que la secuencia de los nucleótidos de su ADN apenas ha cambiado en el curso de la evolución. Se atribuye esa propiedad a los genes que son fundamentales para la supervivencia; si bien sufren mutaciones como los demás genes, la mayoría de los cambios operados resultan letales y, por tanto, no pasan a la generación siguiente. Asimismo, muchos otros genes aparecen en formas diversas; por ejemplo, los que determinan el color de los ojos o el grupo sanguíneo. No ocurre así con los genes muy conservados, de los que no suele haber alelos polimórficos, o variantes alélicas. Si nadie había descubierto una variante del *Hoxa1*, tras examinar muchas especies de mamíferos, no correríamos nosotros mejor suerte buscándole una al autismo. Mas, por otro lado, parecía probable que, si el alelo variante se encontrase, sería a buen seguro una de las espoletas del desarrollo de la enfermedad.

Apuntando al *HOXA1*

El gen correspondiente en humanos se llama *HOXA1* y reside en el cromosoma 7. Bastante pequeño en su tamaño, contiene dos regiones codificadoras de proteína, o exones, junto con regiones que regulan el nivel de producción de proteína o carecen de función alguna. Las desviaciones de la secuencia normal, en cualquier parte de un gen, repercuten en su función, pero en su mayoría las variaciones desencadenantes de enfermedades se encuentran en las regiones que cifran la molécula de proteína. Comenzamos, pues, la búsqueda de alelos variantes, centrándonos en los exones del *HOXA1*. Tomamos muestras de sangre de autistas y de individuos sanos, extrajimos el ADN y rastreamos la presencia de desviaciones que se apartaran de las secuencias normales de los nucleótidos.

Una buena noticia. Cazamos dos alelos variantes del *HOXA1*. Uno

en esa capacidad para desentenderse de un estímulo y fijarse en otro nuevo. Sin embargo, los niños autistas fallaban una y otra vez, incapaces de retirar su atención del primer estímulo, aun cuando fueran muy inteligentes. Sospechan los autores que esta capacidad es una función cerebral de nivel bajo porque aparece típicamente en bebés —de tres a cuatro meses— y en niños con un cociente de inteligencia bajo. Los animales orientan también su atención hacia nuevos estímulos. Podríamos, pues, emplear un test similar en investigación animal para verificar si las manipulaciones genéticas o la exposición a agentes tóxicos producen este síntoma del autismo.—*P.M.R.*



tenía una desviación menor de la secuencia de un exón, lo que significaba que la proteína codificada por el gen variante difería ligeramente de la proteína cifrada por el gen normal. Investigamos de forma exhaustiva el alelo recién descubierto, determinando su incidencia en grupos de personas para establecer si intervenía en el origen del autismo. (El otro alelo variante es más difícil de estudiar porque arrastra cambios en la estructura física del ADN del gen.)

Vimos que la frecuencia de aparición de alelos variantes en autistas era significativamente mayor que en sus familiares exentos de esa patología y que en otros individuos no emparentados sin autismo. Las diferencias eran mucho mayores que lo que cabía esperar por azar.

Y una mala noticia. Como habían predicho los estudios con familias, el *HOXA1* es un gen más entre los implicados en el espectro de las disfunciones autistas. Además, el alelo que examinamos se expresa de manera variable, vale decir, su presencia no garantiza la presencia de autismo. De acuerdo con los datos provisionales, el alelo variante ocurre en un 20 por ciento de la gente que no padece autismo y en un 40 por ciento de quienes lo sufren. El alelo viene a duplicar el riesgo. Pero en el 60 por ciento de las personas autistas está el alelo, prueba de la implicación de otros factores genéticos en el desarrollo de la enfermedad.

Para descubrir de qué factores se trata, debemos seguir buscando otras variantes en el *HOXA1*; no se olvide que la mayoría de las enfermedades genéticas dependen de la acción de muchos alelos diferentes que se desvían de un mismo gen. Las variantes de otros genes comprometidos en las primeras fases del desarrollo pueden predisponer al autismo. Nosotros hemos descubierto ya una variante alélica del *HOXB1*, un gen del cromosoma 17 que parte de la misma fuente ancestral que el *HOXA1* y cumple funciones semejantes en el desarrollo del tronco cerebral, cuyo efecto en el autismo no parece determinante. Otros investigan regiones del cromosoma 15 y una zona del cromosoma 17 distinta. Aunque se atiende sobre todo a los alelos que aumentan el riesgo, otros alelos parecen rebajarlo. Estos podrían explicar la expresión variable del espectro de las afecciones relacionadas con el autismo.

Cualquier avance, por mínimo que sea, en las bases genéticas del autismo revestiría un gran valor. Piénsese en la posibilidad consiguiente de transferir alelos asociados con el autismo del hombre a ratones e introducir en ellos los cambios adecuados para hacerlos genéticamente susceptibles a la enfermedad. Al exponer estos ratones a sustancias sospechosas de aumentar el riesgo, podríamos abordar la interacción entre factores ambientales y acervo génico, y quizá compilar una lista de sustancias a evitar por la mujer durante las primeras fases de la gestación. Y lo que es más importante, al examinar el desarrollo de estos ratones alterados por ingeniería genética, se podrían obtener más datos sobre las lesiones cerebrales presentes en el autismo. Conocidas las alteraciones cerebrales de los autistas, podrían sugerirse medicamentos y otros medios terapéuticos para aliviar los efectos de las lesiones.

El diseño de un test genético para el autismo —semejante a las pruebas usuales para la fibrosis quística, anemia falciforme u otras— es una cuestión ardua. Al haber, según todos los indicios, tantos genes implicados en la afección, no puede predecirse con exactitud la probabilidad de que el niño nazca autista examinando sólo uno o dos variantes alélicas de los padres. Podrían desarrollarse pruebas, sin embargo, para hermanos de autistas, que a menudo tienen el temor de que sus hijos hereden la patología. Podría buscarse un protocolo de pruebas determinantes de factores de riesgo bien establecidos, lo mismo en el familiar autista que en su hermano sano. Si la persona con autismo presenta varios alelos de alto riesgo, pero su hermano no, podría asegurarse al menos que ni éste ni su progenie se hallarían sujetos a riesgo.

La búsqueda de las causas del autismo constituye una carrera de obstáculos. Pero cada factor de riesgo que identifiquemos correrá un poco el velo del misterio. Y lo que importa más, los nuevos datos generarán nuevas hipótesis. Igual que los resultados de la talidomida nos llevaron hasta el tronco cerebral y el gen *HOXA1*, así también la genética del desarrollo, el estudio del comportamiento, la aplicación de las técnicas de formación de imágenes al cerebro y otros medios nos traerán, cabe esperar, nuevas ráfagas de luz, que redundarán, a la postre, en alivio del terrible sufrimiento producido por la enfermedad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AUTISM AND THALIDOMIDE EMBRYOPATHY: A POPULATION STUDY. K. Strömland, V. Nordin, M. Miller, B. Åkerström y C. Gillberg en *Developmental Medicine and Child Neurology*, vol. 36, págs. 351-356; abril de 1994.

EMBRYOLOGICAL ORIGIN FOR AUTISM: DEVELOPMENTAL ANOMALIES OF THE CRANIAL NERVE MOTOR NUCLEI. P. M. Rodier, J. L. Ingram, B. Tisdale, S. Nelson y J. Romano en *Journal of Comparative Neurology*, vol. 370, n.º 2, páginas 247-261; 24 de junio de 1996.

THINKING IN PICTURES: AND OTHER REPORTS FROM MY LIFE WITH AUTISM. Temple Grandin. Vintage Books, 1996.



1. EL ESTOMAGO DE LA ESCIFOMEDUSA es el área delimitada por cuatro puntos, que aparece en el centro de esta imagen superior de *punctata*, especie del género *Nausithoe*. Destacan también las ocho gónadas rojizas. *Phronima* (*arriba, a la izquierda*) mide de dos a tres centímetros de longitud. *Cunina* (*derecha*) es una hidromedusa capturada raramente, un pariente cercano de la escifomedusa.

Animales PARIENTES

Sönke Johnsen

En el curso de la evolución los animales han ido adquiriendo ingeniosas adaptaciones fisiológicas hasta alcanzar la transparencia de numerosas especies marinas





Zoológico de cristal

Colores iridiscentes, flameantes, se encendieron en la hidromedusa del género *Arctapodema* (*imagen grande de la izquierda*) cuando la luz procedente del foco del fotógrafo incidió en sus finas estriaciones musculares. El molusco transparente *Pterosoma* (*ángulo inferior izquierdo*) tiene una retina elongada que toma imágenes línea por línea, como una cámara de televisión. A su lado, un individuo de especie recién descubierta que todavía carece de nombre. Es un organismo perteneciente al tipo Ctenóforo, que avanza por el agua moviendo los peines laminares dispuestos a lo largo de su cuerpo. Abajo, el anfípodo *Cystosoma* parece un gobio cristalino de cinco centímetros de longitud. Su caparazón exterior contiene mayormente agua; su estómago, mínimo y vertical como una aguja, no se capta en la imagen. Tampoco abundan las capturas del cefalópodo *Vitreledonella richardi* (*derecha*), razón por la cual apenas se ha podido estudiar.



Sifonóforos: cuando uno es muchedumbre

Algunos animales transparentes aprovechan su invisibilidad para algo más que el mero camuflaje pasivo. Los sifonóforos son unos parientes peculiares de las medusas: mitad individuo, mitad colonia. El ejemplo más conocido es la carabela portuguesa. La mayoría son transparentes, pero los hay con órganos urticantes de color que mimetizan larvas de peces, pequeños camarones u otras presas. Los animales persiguen estos órganos sin advertir el organismo transparente y mayor al que están unidos, cayendo prestamente abatidos. Arriba, se nos muestra un sifonóforo de la familia de los Práyidos en estado de contracción, de unos 10 o 12 centímetros de longitud. Los objetos coloreados e iluminados de su interior son células urticantes. El animal se transforma cuando va de cacería, alargándose hasta un metro de longitud, con las células urticantes colgando como si fuera una red rodeada de órganos flotadores. Otro sifonóforo, *Forskalea* (*derecha*), es un pariente cercano de la carabela portuguesa y caza de una manera muy similar a la de los Práyidos.





Polarización: el arma secreta del depredador

En la incesante carrera armamentística entre depredadores y presas, los primeros han desarrollado, algunos, la forma de contrarrestar el camuflaje transparente. En el océano, las moléculas de agua dispersan gran parte de la luz, creando la luz polarizada, cuyas ondas luminosas oscilan en paralelo. El hombre necesita gafas de sol Polaroid para discernir la luz polarizada, pero muchos animales, crustáceos y calamares sobre todo, la perciben con sus propios ojos. Se sirven de esa facultad en la depredación, porque los tejidos de algunas de sus víctimas transparentes apartan o hacen girar la polarización de la luz que pasa a través de ellos. Detectar tal cambio permite a los depredadores sentir la presencia de la presa. En las fotografías del mismo copépodo *Labidocera* (*arriba*), la de la derecha muestra al animal tal como lo verían ojos que pueden detectar el cambio de polarización.

Nadav Shashar y sus colaboradores del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, Massachusetts, acaban de demostrar que el calamar aplica su capacidad de ver la polarización a la búsqueda de alimento transparente. La emplea también para enviar señales secretas a otros congéneres. Shashar ofreció a un calamar la posibilidad de atacar dos cuentas de cristal. Una de las cuentas afectaba la polarización de la luz; la otra, no. El animal prefirió atacar la cuenta que afectaba la polarización de la luz. Observó, asimismo, que bajo iluminación polarizada —el estado natural de la luz en el océano— el calamar detectaba, en un intervalo más amplio, individuos que influían en la polarización.



2. EL CINTURON DE VENUS, un ctenóforo, deriva ante el escafandrista Neil Swanberg en Bimini, una isla de las Bahamas. El animal mide sólo unos milímetros de grosor por dos metros de longitud; no cabe en el recipiente que porta Swanberg. Los métodos habituales para recolectar animales marinos, como las redes de arrastre, aplicados a organismos transparentes producen un amasijo aplastado (*recuadro de la izquierda*). Por esa razón, los escafandristas recogen los especímenes a mano en los primeros 30 metros. A profundidades mayores, la faena corre a cargo de los sumergibles. El *Johnson Sea-Link* (*arriba, derecha*) está equipado con recipientes que se abren y cierran por mecanismos hidráulicos de control remoto.

Salvo el bote en que me encuentro y el buque nodriza, cuya blancura se percibe en la distancia, sólo hay mar y cielo. Tomando una bocanada de aire con mi regulador de buceo, me sumerjo en un agua clara y límpida. La vista llega hasta los 100 metros de profundidad, por lo menos. Me acompañan en la inmersión otros tres biólogos. Mientras bajamos, el azul del agua se oscurece y adquiere un color cobalto medio que deriva hacia morado si nos hundimos más.

A cientos de kilómetros de tierra firme, no buscamos ni un rico arrecife ni pecio alguno consignado. Hemos elegido al azar, en pleno océano, el punto de inmersión. A nuestros pies, un abismo de más de 3000 metros de profundidad. Ese mundo, que abarca el 99 por ciento del espacio habitable del planeta, es un entorno anodino, donde sólo la suave gradación de la luz y el color señala los cambios de tiempo y espacio.

Para nosotros, la ausencia de un punto de referencia nos envuelve en la desorientación más absoluta. Para los animales que viven aquí, eso significa que no hay sitio donde esconderse.

A 18 metros de profundidad interrumpimos el descenso, nos atamos a una cuerda de seguridad que cuelga del bote y empezamos a trabajar. No hay que buscar muy lejos. Una vez se han adaptado nuestros ojos al medio, nos vemos rodeados por docenas de animales transparentes que se mueven despacio. En este zoológico cristalino se distinguen algunas medusas, pero la mayoría de las especies no son fáciles de reconocer, con un tamaño que varía del dedo pulgar a la pelota de baloncesto y más. A unos los delata el alimento ingerido en su estómago, las manchas de color ocasionales o los destellos iridiscentes; otros, sin embargo, alcanzan tal grado de transparencia que no los vemos ni a un palmo. Sacamos de las bolsas los recipientes de plástico. Empieza la recolección.

Vida gelatinosa

Comparten esos organismos un cuerpo gelatinoso, que les reporta notables beneficios. Ese material común a todos es, en buena parte, agua incompresible, por cuyo motivo les protege de la aplastante presión de las profundidades. Tiene suficiente flotabilidad para permitir que algunos se muevan como globos en el abismo. Se trata también de un material inerte y fácil de producir; los animales conformados por él pueden, pues, vivir con poco alimento. Si abunda la comida, los organismos se desarrollan y reproducen a un ritmo vertiginoso; hay quienes en una semana crean enjambres de miles de millones de individuos que cubren miles de kilómetros cuadrados.

Quizá la ventaja principal de la sustancia gelatinosa —y la razón de su éxito evolutivo en el mar— estribe en la transparencia que confiere. Las especies oceánicas que no están protegidas por dientes, toxinas, velocidad o tamaño pequeño suelen mostrarse más o menos translúcidas. La transparencia se torna un fenómeno raro a profundidades donde la luz solar nunca penetra.

En contrapartida, los animales gelatinosos deben ser delicados y lentos. Bastantes de ellos dependen, de un modo casi exclusivo, de la invisibilidad; constituye ésta la forma culminante del camuflaje, para esquivar a los depredadores y acechar a las presas.

Pese a su importancia en el reino marino, queda mucho por conocer sobre la transparencia. Mi propia investigación ha tenido que empezar por abordar cuestiones básicas, del tenor del grado de transparencia máximo posible o las características fisiológicas, insólitas, que permiten alcanzar semejantes niveles de translucidez.

Para entender la ecología de la transparencia precisamos determinar el grado real de ésta en los organismos. Encontramos ya un primer escollo en la captura. Si los queremos transparentes, hemos de atraparlos vivos y sanos, pues al morir se vuelven en seguida opacos. Y no es fácil aprehenderlos, dada su extrema fragilidad; en algún caso, basta la turbulencia de la cola de un pez cercano para desgarrarlos. Para capturarlos, dependemos, pues, de las inmersiones con escafandra y sumergibles. Así hemos recogido un muestrario amplísimo de animales transparentes, en buenas condiciones.

En el laboratorio del buque oceanográfico medía la transparencia de los individuos a través del espectro visible. Contaba para ello con un espectrómetro parecido al empleado por los oculistas para medir la transparencia del ojo humano.

La transparencia de los animales fluctuó en un intervalo de valores bastante más amplio del que intuíamos por mera inspección visual. La cantidad de luz que atravesaba sus cuerpos varió entre 20 y 90 por ciento. No sorprendió que los animales mayores y con más tejido buscaran la compensación en un tejido transparente. Más inesperado resultó descubrir que había organismos a 750 metros de profundidad no menos transparentes que los someros.

La observación, desconcertante, contradecía la presunción de una mayor difusión de la transparencia cerca de la superficie, la zona más luminosa, donde resultaba harto difícil esconderse. No se entendía la necesidad de tamaña transparencia en zonas abisales, donde los organismos ya resultaban invisibles a sólo centímetros, o incluso milímetros, de los ojos de sus depredadores.

Comprenderemos mejor la razón de esa transparencia si consideramos que la visibilidad de un objeto depende de su contraste, es decir, de su brillo frente al entorno. Para un organismo oceánico, la porción de agua que media entre el animal y su observador dispersa y absorbe la luz reflejada por el primero. Cuanto más alejado se encuentre un animal, su imagen ofrecerá menos contraste y costará más percibirlo. A cierta distancia, que dependerá del contraste original del animal y del grado en que el agua afecte a la luz, caerá el contraste por debajo de lo que el observador alcanza a ver. Superada esa distancia, que en el argot se denomina distancia de observación, el animal resulta invisible (y está a salvo).

Transparencia y estructura

La transparencia abarca el cuerpo entero, no sólo su exterior; en eso se distingue de otras formas de camuflaje. Para conseguirlo, la evolución tuvo que habérselas con problemas imponentes.

Hay soluciones exitosas que se aprecian a simple vista. Así, la figura plana y delgada de algunos. Pasa más luz cuanto más delgado es el cuerpo. Si un centímetro de molusco deja pasar la novena parte de la luz, medio centímetro dejará pasar un tercio. La forma aplanada dificulta la percepción del perfil. La larva de pez denominada leptocéfala y otros han desarrollado esa habilidad hasta extremos insólitos y son como obleas vivientes, de uno o dos milímetros de grosor por decenas de centímetros de longitud. Ciertos ctenóforos que portan el nombre romántico de “Cinturón de Venus” son largos y planos como un ceñidor. Las larvas de las

SÖNKE JOHNSEN llegó a la biología desde la matemática y las bellas artes, atraído por la geometría y estética de las formas animales. Adscrito a la Institución Woods Hole de Investigaciones Oceanográficas en Cape Cod, trabaja en el campo de las relaciones de la luz con la biología marina.

langostas caribes semejan monedas de 100 pesetas, finas como el papel; las descubriremos sólo por el fugaz paso de su sombra.

Otras adaptaciones afectan a órganos que, por razones físicas, no pueden ser transparentes; las retinas, por ejemplo: puesto que han de absorber la luz para ver, una parte de los ojos al menos será siempre visible. Para resolver el problema se han ideado tres soluciones. Unos organismos tienen los ojos en los extremos de largos pedúnculos, lo más alejados del cuerpo posible. Otros, como el crustáceo *Phronima*, han desarrollado una retina compacta hasta el extremo y se sirven de conductos naturales, a modo de cables de fibra de vidrio, para canalizar la luz hacia ellas. Por fin otros, como el crustáceo *Cystosoma*, tienen ojos enormes con retinas pálidas y muy delgadas debajo mismo de la córnea.

El estómago es otro órgano forzosamente visible, no tanto por exigencias de la propia estructura anatómica, cuanto por su contenido; el alimento animal o vegetal, parcialmente digerido, es opaco. Por eso, en especies translúcidas el estómago, acuiforme, apunta hacia abajo, cualquiera que sea la orientación del animal. Esta disposición resulta eficaz ante los depredadores que, mirando hacia arriba, buscan sus presas en las sombras que celan la luz de la superficie. Otra estrategia consiste en recubrir el estómago con tejido reflectante. En mar abierto, esa textura semeja un espejo, invisible porque la luz que refleja no se distingue de la luz del fondo. El mismo principio explica por qué los peces se visten con una librea de escamas plateadas, a modo de espejos.

Un tercer órgano problemático es la piel, que siempre refleja parte al menos de la luz. Algunos animales se las arreglan con formas corporales simples, que limitan la cantidad de piel y la complejidad de los reflejos. Menos común, aunque más sugestiva, es la solución de los que desarrollan una textura microscópicamente desigual en la superficie de sus cuerpos, que minimiza la reflexión de una manera fascinante y sutil.

De la postrera estrategia se ha ocupado Andrew Parker, del Museo Australiano en Sidney. Depende ésta del índice de refracción del material, que indica la velocidad de la luz a través de un material. La luz viaja en un material con un alto índice de refracción más lenta que en otro con un bajo índice.

Si una superficie presenta numerosas protuberancias, menores que la semilongitud de onda de la luz que incide sobre ellas, la superficie entera se comporta como una substancia uniforme con un índice de refracción que es el promedio de las protuberancias y el medio circundante (agua, en nuestro caso). Ahora bien, las protuberancias son mayores en el fondo que en la parte superior; por tanto, el índice de refracción en la base se aproximará más al del material, por norma más alto que el del agua. De acuerdo con esa misma razón, el índice será más bajo cerca de la cima de las protuberancias.

En consecuencia, el incremento del índice de refracción desde el agua circundante hacia el cuerpo del animal no procede de una forma brusca, sino suave. Esta transición parsimoniosa reduce el reflejo; de hecho, funciona tan bien, que los físicos recurren a ese principio para mejorar los recubrimientos de lentes en óptica de alta resolución. También lo aplica Northrop Grumman en sus sigilosos bombarderos B-2 para minimizar los reflejos de la superficie del avión al radar.

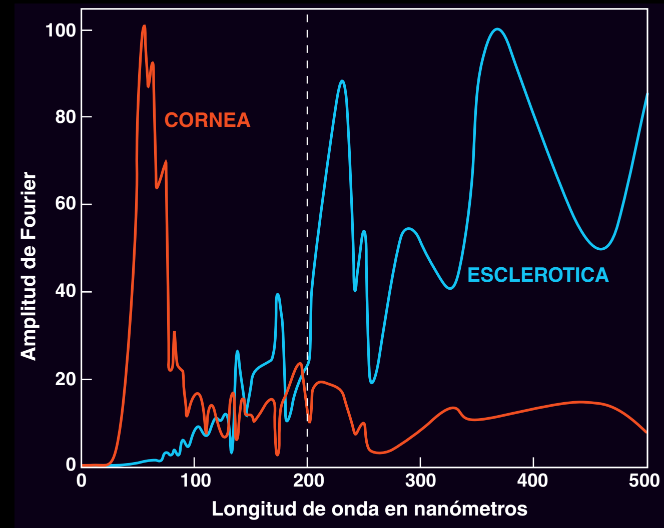
Requisitos para la invisibilidad

Disminuir los reflejos hasta un mínimo es necesario, pero no suficiente para la invisibilidad. La luz

Por qué la córnea es translúcida

El análisis de Fourier determina las frecuencias predominantes en un conjunto de ondas u otros fenómenos repetitivos. Constituye una herramienta poderosa para estudiar la transparencia de los animales gelatinosos y de la córnea humana. La córnea y la esclerótica circundante consisten en disposiciones periódicas o semirregulares de proteínas fibrosas, lo mismo que el cuerpo de los animales. Cuando estas fibras se hallan perfectamente ordenadas y espaciadas con una “longitud de onda” menor que la semilongitud de la onda más corta de la luz visible, el tejido se aproxima a la transparencia. Ello se debe a que la luz que atraviesa el tejido, la refuerza de forma constructiva, mientras que la luz dispersada hacia los lados se anula por interferencia destructiva.

En la gráfica presento los datos que recogí para la córnea y para la esclerótica del ojo. En ambos casos, las fibras del tejido existen bajo una variedad de pautas repetitivas, cada una con una longitud de onda diferente. Estas longitudes de onda se ilustran en el eje X. La predominancia de un tejido con determinada longitud de onda se indica por su correspondiente valor en el eje Y. En la córnea, por ejemplo, predominan las fibras que se repiten en una pauta con una longitud de onda cercana a 50 nanómetros, que se aproxima a la semilongitud de onda de la luz violeta, la más corta que puede ser vista por el ojo humano. Por contra, la esclerótica tiene picos por encima de 200 nanómetros, mostrándose opaca. —*S.J.*



debe atravesar inalterada el cuerpo, sin que los rayos sufran en su camino dispersión ni absorción. Cualquiera de estos fenómenos dejaría el cuerpo expuesto a la observación. De los dos, la dispersión constituye, sin embargo, el óbice principal contra la transparencia del cuerpo, pues hay muy pocas moléculas orgánicas que absorban la luz.

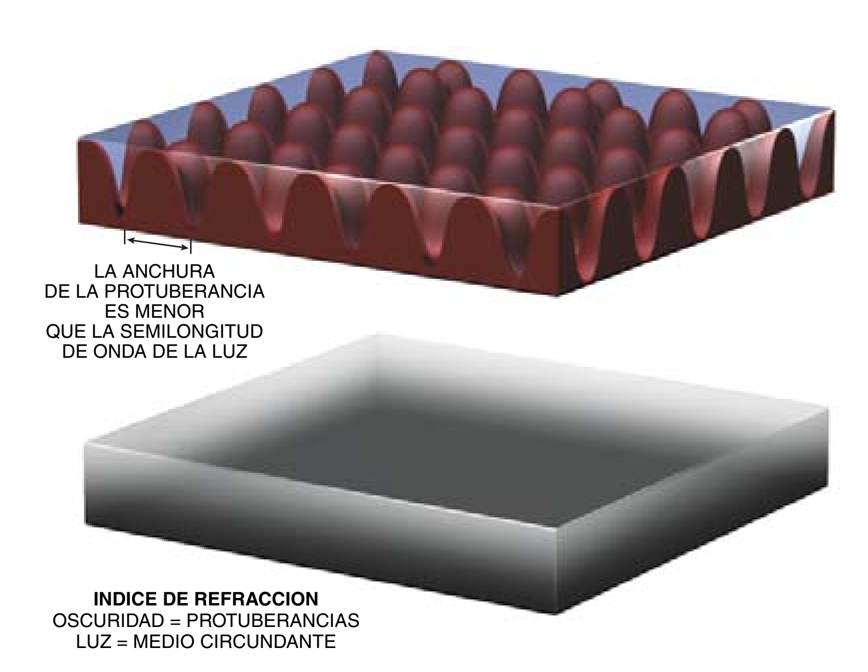
La dispersión viene inducida por las variaciones experimentadas en el índice de refracción. Cuando los rayos pasan de un material a otro, el cambio en el índice de refracción altera la velocidad de la luz. Además, la dirección del haz cambia, a no ser que éste incida perpendicular.

El tejido del animal suele presentar muchas variaciones en el índice de refracción, debido a los diversos componentes que la vida requiere (células, fibras, núcleos, nervios, etc.). Los propios animales gelatinosos, caracterizados por su considerable proporción de agua, manifiestan también variaciones del índice de refracción. La relación entre la variación del índice de refracción y la dispersión de la luz es extraordinariamente compleja. Desconocemos aún los pormenores de la distribución del índice de refracción en el interior del tejido vivo.

Con todo, usando modelos simplificados y dando por cierto que el tejido necesita ciertas cantidades de componentes para sobrevivir, examiné de qué manera el tamaño, la forma y el índice de refracción de tales componentes influían en la cantidad de luz dispersada. Los desarrolladores de pinturas domésticas usan métodos similares para maximizar la dispersión de la luz y, por tanto, la opacidad de los colores.

Los factores principales resultaron ser la distribución y el tamaño de los componentes. Si una célula necesita cierta cantidad de grasa para sobrevivir, pero debe dispersar la menor luz posible, hará bien en dividir la grasa en múltiples gotitas. Acertaría menos si la dividiera en gotas grandes. Y su peor opción, con mucho, sería dividir la grasa en gotas del mismo tamaño que la longitud de onda. Menos relevancia tiene el índice de refracción de la grasa; y menos todavía, la forma de la gota. Estos factores nos enseñan qué buscar en la anatomía microscópica de los animales transparentes.

Pero las variaciones del índice de refracción no provocan siempre dispersión. Si el intervalo de variaciones del índice de refracción es menor que la semilongitud de onda de la luz, la luz dispersada por todas las variaciones se anulará por interferencia destructiva, fenómeno éste que acontece cuando las ondas de luz se solapan y se aniquilan mutuamente.



3. PROTUBERANCIAS de la superficie exterior del cuerpo de un animal. Aumentan la invisibilidad al reducir los reflejos. Las protuberancias con anchuras menores que la semilongitud de onda de la luz incidente carecen de un índice de refracción propio; el índice de refracción viene a ser entonces el promedio del índice de las protuberancias y el del entorno. Ahora bien, puesto que las protuberancias se estrechan suavemente, hay más material en la base que en la cima. Y así, el índice de refracción cambia ligeramente desde el valor que tiene el material hacia el propio del medio. El cambio gradual interfiere con la capacidad de la superficie rugosa para reflejar la luz.

Fijémonos en la esclerótica y la córnea del ojo. Ambas están hechas de capas densas de fibras de colágeno. Ahora bien, por ser menores las fibras de la córnea y estar mejor empaquetadas, las variaciones del índice de refracción serán todas menores que la semilongitud de onda de la luz. Se produce, por tanto, una fuerte interferencia destructiva y el órgano es transparente. Sin esta interferencia, tendríamos una córnea opaca del todo. Las cataratas aparecen cuando, a edad avanzada, se altera el empaquetamiento uniforme de fibras, arruinando la interferencia destructiva.

La transparencia constituye un ejemplo extraordinario de la evolución en respuesta a circunstancias difíciles. Los animales translúcidos, de suma delicadeza, han encontrado la manera de sobrevivir en un medio abierto y peligroso, gracias a las modificaciones ingeniosas de sus cuerpos y células. Como sucede a menudo, sus estrategias evolutivas naturales rivalizan con los últimos adelantos técnicos; en nuestro caso, con la fibra óptica, los recubrimientos ópticos antirreflejantes y las pinturas domésticas. Su estudio importa en la investigación sobre cataratas y en el campo en expansión de la diagnosis y fototerapia de las enfermedades dermatológicas. Nadie imaginaría que esas sutiles criaturas encierran misterios de cuyo desciframiento seremos los primeros beneficiados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE OPEN SEA, ITS NATURAL HISTORY: THE WORLD OF PLANKTON. A. C. Hardy. Houghton Mifflin Company, 1956.

BENEATH BLUE WATERS: MEETINGS WITH REMARKABLE DEEP-SEA CREATURES. K. Madin y D. Kovacs. Viking Press, 1996.

THE PHYSICAL BASIS OF TRANSPARENCY IN BIOLOGICAL TISSUE: ULTRASTRUCTURE AND THE MINIMIZATION OF LIGHT SCATTERING. S. Johnsen y E. A. Widder, en *Journal of Theoretical Biology*, volumen 199, n.º 2, páginas 181-198; julio de 1999.



Confinamiento de los gases de invernadero

Sepultar bajo tierra o en las profundidades oceánicas el dióxido de carbono podría aliviar algo las preocupaciones sobre el cambio climático

Howard Herzog, Baldur Eliasson y Olav Kaarstad

El foco del debate sobre el cambio climático se ha desplazado. Hasta ayer mismo, todavía se dudaba de que el origen de las alteraciones del clima fuera la actividad humana. Concretamente, ¿había que culpar a las emisiones de gases por el llamado efecto invernadero, que atrapan el calor radiado por la superficie terrestre? Con pruebas abrumadoras en favor del "sí", el debate se centra ahora en las medidas a tomar para proteger nuestro clima.

Una solución que podemos desechar con certeza casi absoluta es el agotamiento de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Morris Adelman, experto en la economía del petróleo y gas, lleva treinta años insistiendo en este punto. En los últimos 150 años, desde los principios de la era industrial, la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2) ha crecido casi un tercio, de 280 a 370 partes por millón (ppm), sobre todo por la quema de combustibles fósiles. En los años noventa, la humanidad descargó un promedio anual de 1,5 ppm de CO_2, índice que sigue aumentando año tras año. Si bien éste no es el único gas de invernadero emitido —otros son, por ejemplo, el metano y el óxido nitroso—, los expertos cifran en dos tercios la contribución de las emisiones de dióxido de carbono al calentamiento global previsto. El

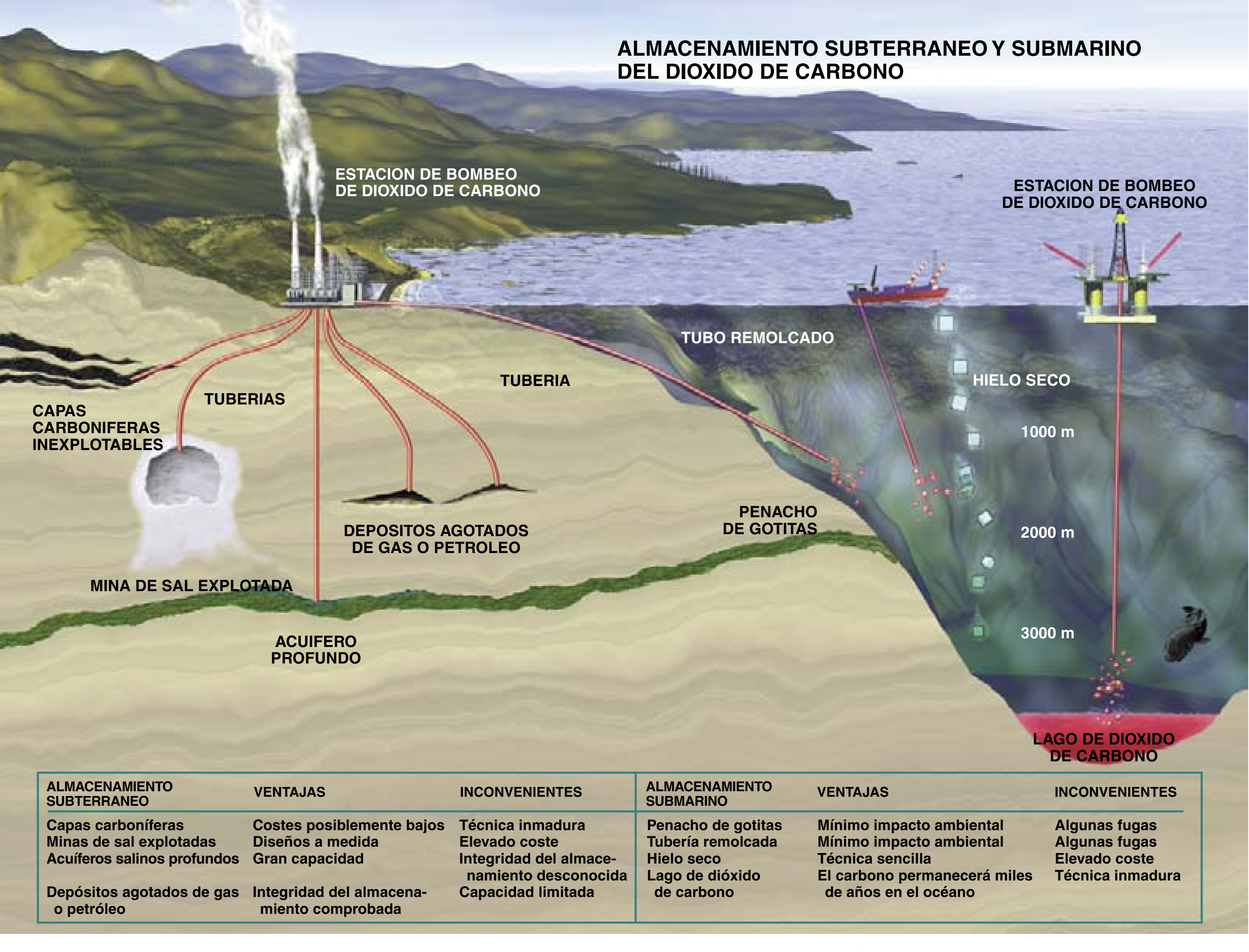
1. A GRAN PROFUNDIDAD, unos 1000 metros bajo el fondo del mar del Norte, el dióxido de carbono se bombea hasta la formación de Utsira, cavidad de arenisca donde permanecerá almacenado miles de años. Los propietarios de la plataforma de gas natural de Sleipner, a unos 240 kilómetros de la costa, evitan ahora el impuesto que grava el CO_2 en Noruega, enterrando el gas de invernadero que de otro modo se liberaría desde la plataforma a la atmósfera.

temor a las posibles catástrofes que comporta un cambio del clima mundial instiga a grupos ecologistas, gobiernos y ciertas industrias a intentar reducir el nivel de gases de invernadero en la atmósfera, mejorando la eficacia energética y buscando fuentes de energía alternativas.

Lo cierto es, sin embargo, que los combustibles fósiles son baratos y abundantes y seguirán alimentando coches, casas y fábricas durante el siglo XXI, y tal vez más allá. En los últimos cien años han llovido los augurios pesimistas de escasez de las reservas, pero las continuas mejoras en la exploración petrolífera y las técnicas de producción deberían mantener estable el suministro de combustible durante las décadas venideras. Por si fuera poco, desde que en 1992 se firmó en la Cumbre Mundial de Río de Janeiro el primer tratado internacional destinado a estabilizar las emisiones de gases de invernadero, la demanda mundial de combustibles fósiles no ha hecho sino aumentar. Al día de hoy, más del 85 por ciento de la energía de uso comercial se obtiene de este tipo de combustibles. Aunque las mejoras de rendimiento energético y la promoción de otras fuentes de suministro sean políticas esenciales para mitigar el deterioro climático, solamente solucionan en parte el problema.

Por otro lado, aunque hoy se cortara de raíz el uso de combustibles fósiles, el planeta seguiría acusando los efectos de las emisiones anteriores. La respuesta temporal del clima es lenta. El CO_2 permanece en la atmósfera durante cien o más años si se deja actuar a los factores naturales. Hay, pues, que contar con un repertorio de opciones técnicas para poner freno a la creciente acumulación de gases de invernadero. Ya se trabaja en la investigación y desarrollo de nuevos métodos para mejorar el rendimiento energético y emplear más a menudo combustibles que no contengan carbono (fuentes renovables o energía nuclear). Pero una tercera vía atrae la atención, en vista de que las dos primeras opciones serán insuficientes: consiste en confinar el dióxido de carbono en depósitos de almacenamiento.

La captura del carbono suele asociarse a la plantación de árboles. En su desarrollo, los árboles (y en general los vegetales) absorben el CO_2 del aire y lo mantienen durante toda su vida. Se estima que las plantas, en su totalidad, retienen unas 600 gigatoneladas de carbono, con otras 1600 gigatoneladas en el suelo.



ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	ALMACENAMIENTO SUBMARINO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Capas carboníferas	Costes posiblemente bajos	Técnica inmadura	Penacho de gotitas	Mínimo impacto ambiental	Algunas fugas
Minas de sal explotadas	Diseños a medida	Elevado coste	Tubería remolcada	Mínimo impacto ambiental	Algunas fugas
Acuíferos salinos profundos	Gran capacidad	Integridad del almacenamiento desconocida	Hielo seco	Técnica sencilla	Elevado coste
Depósitos agotados de gas o petróleo	Integridad del almacenamiento comprobada	Capacidad limitada	Lago de dióxido de carbono	El carbono permanecerá miles de años en el océano	Técnica inmadura

2. LOS DEPOSITOS DE ALMACENAMIENTO del CO_2 bajo tierra o en las profundidades marinas deben conservar el gas de invernadero fuera de la atmósfera, donde ahora fomenta el cambio climático. Las diversas opciones tienen que examinarse con atención en cuanto a costes, seguridad y posible impacto ambiental.

Las plantas y los suelos podrían quizás absorber otras 100 gigatoneladas de carbono por lo menos, pero se requieren nuevos sumideros para afrontar el crecimiento de las emisiones. Así las cosas, nosotros hemos explorado otra posibilidad en los últimos 10 años: capturar el CO_2 de fuentes estacionarias —por ejemplo, una planta química o una central eléctrica— e inyectarlo en el fondo del océano o enterrarlo bajo el suelo. No nos encontramos solos en esta labor. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) y otras instituciones se hallan también implicadas.

Un nuevo enfoque en Noruega

En el mar del Norte, a unos 240 kilómetros de la costa noruega, se ubica el yacimiento de petróleo y gas natural de Sleipner. Desde una de las plataformas de extracción de gas natural se inyectan 20.000 toneladas de CO_2 por semana en los poros de una capa de piedra arenisca a 1000 metros por debajo del fondo marino. El comienzo de la inyección en Sleipner, en octubre de 1996, fue el primer caso de reclusión de dióxido de carbono en una formación geológica por razones ambientales.

¿Cómo se llegó a tal decisión? Las reservas del yacimiento contienen gas natural con el 9 % de CO_2 diluido, proporción excesiva para la venta a clientes, que no suelen aceptar más del 2,5 %. Por eso, igual que en otras explotaciones de gas natural, hay una factoría química anexa que extrae el dióxido de carbono sobrante. En cualquier otra instalación, este CO_2 se emite a la atmósfera sin más contemplaciones. Pero los propietarios del yacimiento Sleipner —Statoil, Exxon, Norsk Hydro y Elf— decidieron sepultar el gas de invernadero, tras comprimirlo y bombearlo por un pozo hasta la formación de Utsira, una capa de arenisca de 200 metros de espesor que originalmente contuvo agua salada. Puede que no parezca gran cosa que en 1999 se enterraran en Sleipner casi un millón de toneladas de CO_2, mas para un país pequeño como Noruega esto supone alrededor del 3 % de las emisiones totales de gases de invernadero a la atmósfera.

El motivo principal de devolver el carbono a la tierra en Sleipner fue el impuesto sobre el dióxido de carbono en aguas noruegas, que en 1996 ascendió a 8300 pesetas por tonelada de gas emitido (el 1 de enero de 2000 el impuesto se ha reducido a 6300 pesetas por tonelada). La inversión en el equipo compresor y el pozo para

el CO_2 totalizan unos 13.200 millones de pesetas. Si el dióxido de carbono se hubiera lanzado a la atmósfera, las compañías habrían contraído una deuda de unos 8300 millones por año entre 1996 y 1999. Las inversiones se recuperan, por tanto, con el ahorro de un año y medio.

En otros lugares del mundo se preparan proyectos similares. En el mar de China meridional, el yacimiento de Natuna contiene gas natural con casi un 71% de CO_2. Cuando se explote comercialmente, se confinará el exceso de dióxido de carbono. Otros estudios investigan la posibilidad de almacenar bajo tierra el CO_2 capturado, incluso dentro de las instalaciones de gas natural licuado del campo Gorgon, en la plataforma continental del noroeste de Australia, y el yacimiento de gas Snohvit en el mar de Barents, así como en los campos petrolíferos de la vertiente septentrional de Alaska.

En todos los proyectos hoy en desarrollo o en curso, los motivos de capturar el CO_2 son de índole comercial: hay que depurar el gas natural para poder venderlo. Las compañías se enfrentan al dilema de liberar en la atmósfera el gas de invernadero o almacenarlo. Por ahora, en su mayoría optan por no recoger el dióxido de carbono. Cabe esperar que en el futuro haya más compañías obligadas a reducir las emisiones de este gas que decidan confinarlo donde no haga daño. Más difícil será convencer a las empresas que explotan las centrales térmicas de que deben capturar las emisiones de CO_2, dados los costes asociados a tal extracción.

Subterráneo o submarino

Se conoce muy bien la técnica de inyectar CO_2 en capas subterráneas, una suerte de proceso inverso al de extracción de petróleo y gas natural del subsuelo. Se trata de un proceso común en muchas explotaciones. La inyección de dióxido de carbono en un yacimiento de petróleo aumenta la movilidad del crudo en su interior, con el consiguiente crecimiento de la productividad del pozo. Durante 1998, en los campos petrolíferos de Estados Unidos se bombearon en total al subsuelo unos 43 millones de toneladas de CO_2 en más de 65 proyectos de recuperación estimulada del crudo. Sin embargo, esta cantidad se traduce en una separación de carbono bastante pequeña. Por contra, las formaciones geológicas que comprenden acuíferos salinos como los de Sleipner, capas carboníferas de imposible explotación, filones de crudo o de gas agotados, cavernas de roca y domos de sal pueden, en su conjunto mundial, encerrar cientos, si no miles, de gigatoneladas de carbono.

Si bien las formaciones geológicas ofrecen un gran potencial de almacenamiento, el mayor depósito imaginable del CO_2 antropogénico está en las profundidades oceánicas. Se estima en 40.000 gigatoneladas el carbono disuelto en los mares (la atmósfera contiene 750 gigatoneladas nada más), pero su capacidad de absorción es mucho mayor. Aunque los humanos añadieran al océano una cantidad de dióxido de carbono equivalente a duplicar la concentración atmosférica preindustrial de este gas, el contenido de carbono de las aguas profundas sólo variaría en menos del 2 por ciento. Sin duda, hay procesos naturales, de acción lenta, que harán llegar a los océanos algo así como el 85 por ciento de las emisiones actuales al cabo de cientos de años. Pero nuestra intención es conseguir resultados más rápidos.

Para un confinamiento oceánico eficaz, debe inyectarse el dióxido de carbono por debajo de la termoclina, capa ésta situada entre 100 y 1000 metros de profundidad que registra una caída brusca de la temperatura del agua. Las aguas inferiores, frías y densas, ascienden con extrema lentitud termoclina arriba, de suerte que tardan siglos en mezclarse con las aguas situadas por encima de dicha capa. Cualquier porción de CO_2 que esté por debajo de la frontera termoclínica quedará atrapada. Como regla general, cuanto más profundo se inyecte el

LOS FUNDAMENTOS

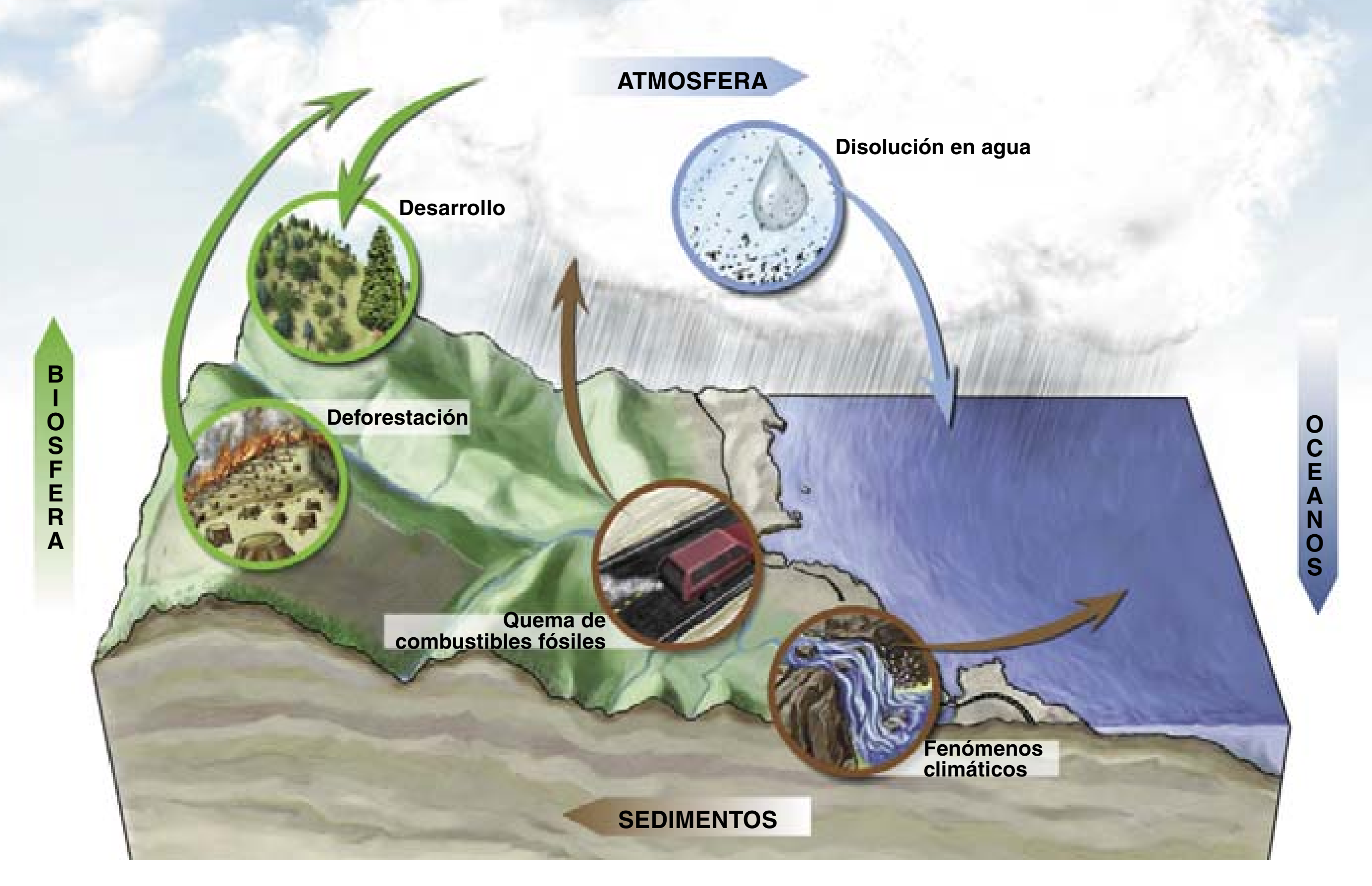
CONFINAMIENTO DEL DIOXIDO DE CARBONO

¿En qué consiste la separación del carbono? Se trata de almacenar el CO_2, gas de invernadero, en depósitos naturales, para no tener que arrojarlo a la atmósfera. Aunque la captura del carbono suele asociarse con la repoblación forestal, estamos estudiando su posible secuestro a partir de fuentes estáticas —centrales térmicas, por ejemplo— e inyectarlo en las profundidades oceánicas o continentales.

¿Dónde almacenar el dióxido de carbono? Puede bombearse a formaciones geológicas del subsuelo, tales como capas carboníferas inexplotables, pozos de petróleo y de gas agotados o acuíferos salinos, siguiendo un proceso esencialmente inverso al bombeo de petróleo desde yacimientos subterráneos. También se investiga la posibilidad de sumergir burbujas de CO_2 directamente en el mar, a concentraciones que no afecten al ecosistema circundante y a profundidades que garanticen su permanencia en el medio marino.

¿Cómo comprobar la seguridad del almacenamiento? Un objetivo esencial es garantizar que el CO_2 se almacena de un modo seguro y sano para el medio ambiente. El recuerdo de la tragedia del lago Nyos en Camerún, en 1986, cuando una enorme burbuja de dióxido de carbono reventó desde el lago y asfixió a cerca de 1700 personas, subraya la importancia de la seguridad, especialmente en el almacenamiento subacuático. Sin embargo, las condiciones del lago eran totalmente diferentes a las que caracterizan la separación del carbono en el mar. En modo alguno un lago pequeño puede retener una gran cantidad de CO_2, razón por la cual resultó inevitable la catástrofe de Nyos. Pero en los océanos no existen tales limitaciones; en los depósitos subterráneos la naturaleza presenta un buen historial de seguridad: los depósitos del domo McElmo en Colorado han retenido durante siglos grandes cantidades de dióxido de carbono.

¿Hay algún proyecto en curso de separación del carbono? La plataforma de gas natural de Sleipner, frente a las costas de Noruega, bombea CO_2 en un acuífero salino a 1000 metros bajo el fondo marino. Aunque Sleipner sea hoy el único proyecto de separación que tiene por finalidad prevenir el cambio climático, ya otros proyectos comerciales utilizan esta técnica. Una docena larga de centrales eléctricas separan el CO_2 de sus gases de escape; así, la de Shady Point, construida por la compañía internacional ABB. Y en más de 65 pozos de petróleo en EE.UU. se inyecta el gas en el subsuelo para potenciar el rendimiento de la perforación.



3. EXISTEN DEPOSITOS NATURALES DE CARBONO en la atmósfera, los océanos, los sedimentos y la biosfera, entre los cuales se producen diversos intercambios. Cuando quemamos combustibles fósiles, transferimos a la atmósfera el carbono que guardaban los profundos sedimentos terrestres. El confinamiento del carbono tiene por objetivo detraerlo de la atmósfera para llevarlo hacia uno de los otros tres medios de almacenamiento.

CO_2, más tiempo tardará en llegar a la atmósfera.

Hay dos maneras de introducir dióxido de carbono en el agua del mar: disolverlo a profundidades moderadas (de 1000 a 2000 metros), para formar una solución diluida, o inyectarlo por debajo de los 3000 metros, para crear un lago de CO_2. La primera alternativa busca reducir al mínimo los efectos ambientales diluyendo el dióxido de carbono; con la formación del lago se intenta prolongar al máximo la permanencia oceánica del gas.

La idea de almacenar el CO_2 en las profundidades marinas puede remontarse a un trabajo publicado en 1977 por Cesare Marchetti. Sugería que el CO_2 podía conducirse entubado a las aguas del Mediterráneo, en el estrecho de Gibraltar, desde donde fluiría al Atlántico para hundirse en los grandes fondos oceánicos. Hoy mismo, tender sobre el fondo del mar una tubería que transporte el dióxido de carbono hasta la profundidad adecuada sigue siendo una de las opciones más practicables para confinar este gas. Se han propuesto otros modos de inyección, tales como arrojar hielo carbónico seco al mar desde barcos, introducir CO_2 a 1000 metros de profundidad a través de un tubo remolcado por un barco y tender una tubería hasta depresiones del lecho marino, a 3000 o más metros de profundidad.

¿Seguro y sano?

Aun disponiendo de las técnicas necesarias para almacenar el carbono en depósitos terrestres y oceánicos, importa comprender mejor su impacto ambiental. Es obvio que el proceso de reclusión del dióxido de carbono ha de ser siempre menos nocivo para el entorno que la emisión continua de gases de invernadero a la atmósfera. Si el almacenamiento es subterráneo, habrá que evaluar la estabilidad a largo plazo de la formación que sirviera de depósito. Se ha de ponderar la integridad estructural del emplazamiento, no sólo porque garantiza que el gas almacenado no vuelva gradualmente a la atmósfera, sino también porque un brusco escape del CO_2 en una zona poblada desencadenaría una catástrofe. Al ser más pesado que el aire, una descarga rápida y masiva del gas desplazaría el oxígeno de la superficie y asfixiaría a los organismos. Pero nos tranquiliza saber que la naturaleza ha almacenado bajo tierra CO_2 durante millones de años en depósitos como los del domo McElton en el sudoeste de Colorado, lo que significa que puede hacerse con plena seguridad.

La reclusión oceánica plantea varios retos. Por encima de todo preocupa la repercusión en la acidez del mar. De acuerdo con el método de liberación del CO_2, el *p*H del agua del mar en las proximidades del lugar de la inyección podría situarse entre 5 y 7. (Un *p*H 7 se considera neutro; el del agua de mar se cifra en 8.)

Un fuerte cambio de la acidez podría dañar el zooplancton, las bacterias y los organismos del fondo incapaces de trasladarse hacia aguas menos ácidas. La investigación realizada por uno de nosotros (Herzog) y E. Eric Adams sugiere, sin embargo, que los problemas de acidez podrían reducirse mucho, hasta desaparecer, si se mantiene diluida la concentración de dióxido de carbono. Por ejemplo, una dilución de una parte por millón produce un cambio de *p*H inferior a 0,1. Esta concentración tan débil se conseguiría liberando el dióxido de carbono en gotitas desde un tubo en el fondo del mar o un barco de arrastre.

En los próximos años se emprenderán diversos experimentos para evaluar la posibilidad de almacenar grandes cantidades de CO_2 de un modo seguro e inocuo para el entorno. Así, en el verano de 2001 investigadores de Estados Unidos, Japón, Suiza, Noruega, Canadá y Australia comenzarán un estudio en aguas de Costa Kona en Hawai para examinar la viabilidad técnica y el impacto ambiental del almacenamiento oceánico de carbono. (En este proyecto participamos Herzog y Eliasson.)

El plan consiste en ejecutar una serie de 10 pruebas durante un período de dos semanas, liberando CO_2 a una profundidad de 800 metros. Observaremos el penacho de gotas que se produzca; mediremos el *p*H del agua y la cantidad de carbono inorgánico disuelto. Con estos datos podremos perfeccionar los modelos informáticos y, por tanto, generalizar los resultados del ensayo para predecir con mayor precisión los efectos ambientales. También nos interesa saber cuál es la técnica más eficaz para la pronta dilución de CO_2.

Aspectos económicos

Además de las cuestiones de viabilidad y seguridad ecológica, hay que considerar la inversión económica. Dado que las centrales térmicas producen cerca de un tercio del dióxido de carbono liberado a la atmósfera, y que ellas mismas son fuentes concentradas de emisiones, constituyen un objetivo lógico para abordar la reclusión del carbono. Además, en esas plantas ya se han realizado experiencias de reducción de contaminantes. (Aunque ante todo se ha buscado controlar agentes como las partículas sólidas, los óxidos de azufre y de nitrógeno e incluso el monóxido de carbono, pero no el CO_2 propiamente dicho.)

Allá por 1910 se introdujeron unos dispositivos llamados precipitadores electrostáticos, que ayudaban a eliminar las partículas emitidas por los combustibles fósiles al arder y sólo encarecían la electricidad moderadamente. Hoy día, una central eléctrica moderna dotada de equipo avanzado de limpieza ambiental para partículas, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, cuesta hasta un 30 por ciento más que una planta que carezca de tal equipo. Y el coste de este equipo ecológico sólo incrementa en 17 a 85 céntimos de peseta el precio del kilowatt-hora generado.

Como los gases de escape de las plantas que consumen combustibles fósiles tienen bajas concentraciones de dióxido de carbono (del 3 al 15 por ciento), no sería económico canalizar todo el flujo del escape hacia los lugares de almacenamiento. Habría que empezar, pues, por concentrar el CO_2 presente en las emisiones. Con el equipo existente esta etapa sería la más costosa. De ahí el interés en crear técnicas que reduzcan dicho coste.

En el método habitual para separar el CO_2, se mezcla una solución diluida de monoetanolamina (MEA) con los gases de la chimenea en el interior de la torre de absorción de una planta dedicada a capturar el gas de invernadero. El CO_2 de los gases de escape reacciona con la solución MEA a temperatura ambiente para formar un compuesto nuevo, de ligera consistencia. Se calienta luego ese compuesto en una segunda columna, la torre de separación, hasta unos

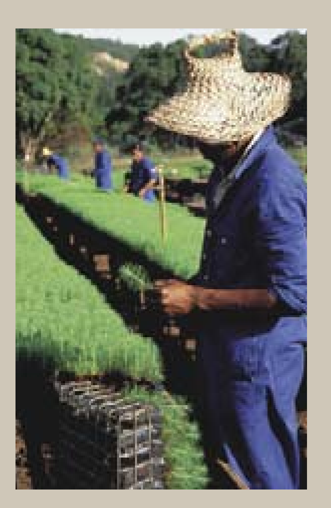
PLANTAR UN ARBOL

Durante más de una década se ha ejecutado un proyecto de separación sistemática del carbono en regiones deforestadas y tierras de labor de Guatemala. No se requieren tuberías subterráneas ni estaciones de bombeo, sino solamente árboles. En su desarrollo, las plantas absorben CO_2 atmosférico, almacenando el carbono en forma de madera. Con miras a capitalizar este proceso natural de reclusión del carbono, las compañías y los gobiernos han iniciado trabajos de reforestación, forestación (plantación en tierras sin forestación previa) y agroforestación (integración de árboles con cultivos agrícolas), como medio para cumplir los compromisos establecidos en el Protocolo de Kyoto, acuerdo medioambiental internacional para reducir las emisiones de gases de invernadero.

En 1988, la compañía eléctrica estadounidense AES inició el primer proyecto de forestación destinado a compensar las emisiones de CO_2. Por aquel tiempo, AES iba a construir una nueva central térmica de combustible carbón en Connecticut, con expectativas de emitir 52 millones de toneladas de CO_2 durante sus 40 años de vida activa. Trabajando en Guatemala con el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y la organización asistencial CARE, AES creó parcelas de bosque comunitarias, introdujo prácticas agroforestales y adiestró brigadas para combatir incendios forestales. AES calcula que van a absorberse hasta 58 millones de toneladas de CO_2 a lo largo de este proyecto. Pasan ya de la docena los programas de este tipo aplicados en unos cuatro millones de hectáreas de bosque de Estados Unidos, Noruega, Brasil, Malasia, Rusia y Australia.

Según recientes estimaciones, los bosques del mundo entero almacenan hoy casi un billón de toneladas de CO_2. Para compensar las emisiones de dióxido de carbono actuales, se calcula que habría que plantar cada año nuevos bosques en una superficie equivalente al total de la India. Los proyectos de forestación no son una solución de efecto rápido, pero ofrecen muchas ventajas, desde mejorar el hábitat para la vida silvestre hasta fomentar el empleo. No obstante, el potencial de reserva de carbono que ofrecen los árboles es limitado, y el enfoque no deja de presentar inconvenientes. Las plantaciones de árboles combaten la biodiversidad de las plantas nativas y pueden perturbar las comunidades locales al obligarles a mudar de asentamiento. Igual que otras muchas soluciones propuestas al cambio climático, los árboles sólo tendrán eficacia como parte de un compromiso global de reducción de las emisiones de gas de invernadero.

—Diane Martindale



PARCELA de plantones en Fidji como parte de un plan de reforestación.

¿PASO ADELANTE EN LA POLITICA DE CAMBIO CLIMATICO?

A consecuencia de las actividades humanas, la concentración atmosférica de CO_2 ha aumentado un 31 % en los dos últimos siglos. Las predicciones habituales estiman que antes del 2100 dicha concentración duplicará el nivel anterior a la era industrial. Quedan pocas dudas de que este aumento transformará el clima, pero se plantean grandes interrogantes en cuanto a la magnitud, distribución en el tiempo y configuraciones regionales de ese cambio; todavía se conocen menos sus consecuencias ecológicas, económicas y sociales.

Pese a tales lagunas, se ha logrado un consenso universal sobre la importancia de evitar emisiones incontroladas de CO_2 a la atmósfera. El intento de estabilizar la concentración de este gas siquiera en el doble de su nivel preindustrial —el objetivo más modesto a nuestro alcance— exigirá reducir las emisiones mundiales de CO_2 alrededor del 50 % sobre los niveles previstos para el año 2050. No puede extrañar que una reducción tan radical requiera una reorganización fundamental de los sistemas de energía mundiales.

Cuando se evalúan las emisiones de gas de invernadero suele darse por sentado que la reducción se logrará combinando una mayor eficacia energética con el paso a otras fuentes de energía que utilicen combustibles no fósiles, como son las radiaciones solares, el viento, la biomasa o la energía nuclear. En el artículo anexo, se expone un enfoque radicalmente distinto: quemar combustibles fósiles sin liberar el CO_2 a la atmósfera, separando las emisiones carbónicas que se entierran en el subsuelo o en las profundidades oceánicas. Creemos que esta estrategia —denominada gestión del carbono— incide en esenciales aspectos económicos y políticos del cambio climático.

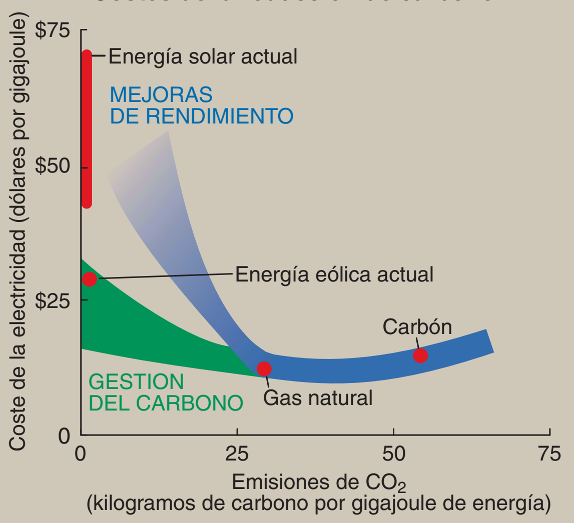
Muchos consideran que estabilizar la concentración de CO_2 en 550 partes por millón (ppm) —el doble del nivel preindustrial— es ya una meta ambiciosa. Pero esta concentración todavía provocará un cambio climático apreciable. No obstante, es muy probable que los problemas ambientales resultantes sólo afecten ligeramente a la producción económica total del mundo; en particular, los países ricos deben salir relativamente ilesos. Pero en determinadas regiones se sentirán más los efectos: habrá lugares que se beneficien mientras otros se deteriorarán. Por ejemplo, aunque en el norte del país los inviernos se tornen más templados, podrían desaparecer de los Estados Unidos ecosistemas enteros, como los bosques de las montañas del sudoeste, los arroyos alpinos y ciertos bosques de la costa. Estas presumibles consecuencias —y lo que es más importante, la posibilidad de cambios imprevistos— son razones convincentes para estabilizar las concentraciones por debajo de 550 ppm, siempre que ello se consiga a un coste aceptable.

En la actualidad, el coste de mantener la concentración a no más de 550 ppm por medios tradicionales resulta elevado, no sólo en dinero sino en otros problemas ambientales. Todas las fuentes de combustible no fósil que existen son costosas, y las de tipo renovable tienen baja densidad de potencia: producen una potencia pequeña para el terreno que necesitan. El uso a gran escala de la energía renovable podría, pues, dañar nuestro más precioso recurso ambiental, el suelo. Si bien el progreso técnico debiera reducir el coste de las energías renovables, poco puede hacerse para mejorar sus densidades de potencia, que son inherentes a dichas fuentes.

¿Debemos entonces admitir que la reducción de las emisiones carbónicas sin provocar otros efectos ambientales inaceptables va a causar un fuerte impacto económico? No necesariamente. El quid del problema del coste está en cómo conseguir rápidos avances técnicos que ahorren dinero, en respuesta a un impuesto sobre el carbono. Cabe señalar que la mayoría de los modelos económicos utilizados hoy para evaluar el coste de la reducción de emisiones suponen que la innovación avanza a su propio ritmo y no puede acelerarse por presiones políticas. Según este supuesto, tiene sentido retrasar los trabajos para eliminar emisiones porque así se da tiempo al desarrollo de técnicas mejores que abaraten el coste de las reducciones. En la hipótesis contraria —más próxima a la verdad—, la innovación es muy sensible a los indicadores económicos y políticos. En este caso, resultará muy ventajosa una política que se anticipe al cambio climático, ya que estimulará nuevos desarrollos que favorezcan el descenso de costes en las grandes reducciones de emisiones carbónicas.

La gestión del carbono tal vez sea precisamente esa innovación. Se dispone ya de técnicas similares, y parecen costar bastante menos que las energías renovables para la producción de electricidad. Sin embargo, para lograr fuertes reducciones en las emisiones de gas de invernadero, la sociedad debe comenzar a utilizar combustibles exentos de carbono, como el hidrógeno, para el transporte. Aquí la ventaja relativa de la gestión del carbono sobre las energías renovables es aún mayor que en la producción de electricidad. Además, estas técnicas ofrecen un notable atractivo sobre las energías alternativas: por ser más compatibles con la infraestructura energética existente, esperamos que sus costes desciendan más aprisa que los de las energías renovables.

La gestión del carbono debilita el vínculo existente entre la quema de combustibles fósiles y la emisión de gases de invernadero, lo que hace más soportable la dependencia de los combustibles fósiles que caracteriza a la economía mundial. Esto otorga una superioridad esencial a la gestión del carbono: al reducir la amenaza a las industrias que explotan combustibles fósiles y a las naciones que los producen en abundancia, la gestión del carbono puede suavizar los actuales bloqueos en el terreno político. Dicho crudamente: si la sociedad opta por una gestión del carbono generalizada, las industrias y países que hoy dependen de combustibles fósiles podrán seguir operando con provecho en los mercados de energía actuales y en los que se desarrollen en torno de la gestión del carbono; por ello, estarán más dispuestas a tolerar políticas de reducción sustancial de las emisiones atmosféricas.



LA REDUCCION DE LAS EMISIONES DE CO_2 al pasar de carbón a gas natural puede ahorrar dinero. Los autores sostienen que las ulteriores reducciones basadas en gestión del carbono (*verde*) costarán menos que las conseguidas por energía solar o por extremas mejoras de rendimiento (*azul*). Aunque la energía eólica es bastante barata, la gran superficie de terreno exigida puede impedir su aplicación generalizada.

La gestión del carbono, sin embargo, suscitará profundas reticencias entre los ecologistas. Por varios motivos. La eficacia de la separación del carbono no va más allá de lo que permita la seguridad de los depósitos donde éste se almacena. Las infaustas experiencias de escape de residuos tóxicos y nucleares dejan a muchas personas sensatas con grandes dudas sobre las pretensiones de los expertos en cuanto a larga persistencia del carbono enterrado. Al evaluar la seguridad de los depósitos de carbono propuestos, tanto subterráneos como submarinos, los investigadores deben encarar tal escepticismo con imparcialidad.

Quizá sea aún más desconcertante para los ecologistas que la gestión del carbono entre en conflicto con la creencia, profundamente arraigada, de que la prolongada dependencia de los combustibles fósiles es en sí misma un problema, cuya única solución aceptable son las energías renovables. La gestión del carbono se llamó en sus principios "geoingeniería", etiqueta que hoy comparte con las propuestas de acondicionamiento del clima mundial como, por ejemplo, la inyección de aerosoles en la estratosfera para reflejar la radiación solar y así enfriar la superficie terrestre. Numerosos ecologistas no miran con buenos ojos las soluciones técnicas en gran escala, pues sostienen que sería mejor utilizar fuentes de energía que no requieran unos trabajos de limpieza desmesurados.

La gestión del carbono, una técnica prometedora, debe todavía demostrar su eficacia. Y conviene andar precavidos. La historia de las técnicas de la energía rebosa de soluciones que un día se ensalzaron como salvadoras y hoy desempeñan un papel más bien modesto (la energía nuclear, por ejemplo). Explorar las posibilidades tanto de la gestión del carbono como de las energías renovables exigirá medidas políticas y económicas ahora mismo; a saber, un apoyo más firme a la investigación energética y unos impuestos sobre el carbono o medidas políticas equivalentes que sirvan de incentivo a las empresas para desarrollar y comercializar innovaciones que reduzcan las emisiones a un coste razonable. Es posible que la gestión del carbono permita, por fin, reducir de un modo radical las emisiones de CO_2 en el mundo con un coste políticamente aceptable. Sin lugar a dudas, a unas cuantas décadas vista, la gestión del carbono será nuestro mejor tanto para proteger el clima mundial.

DAVID W. KEITH y EDWARD A. PARSON. Ambos autores colaboran en investigaciones sobre políticas ambientales. Keith es profesor en el departamento de ingeniería de la Universidad Carnegie Mellon. Parson enseña en la Escuela de la Administración Pública John F. Kennedy de Harvard.

HOWARD HERZOG, BALDUR ELIASSON y OLAV KAARSTAD se conocieron en Amsterdam, en 1992, durante la Primera Conferencia Internacional sobre Eliminación del Dióxido de Carbono. Herzog, investigador adscrito al laboratorio de energía del Instituto de Tecnología de Massachusetts, es el autor principal de un Libro Blanco del Departamento de Energía de EE.UU. sobre confinamiento del carbono. Eliasson, jefe del programa de energía y cambio global de ABB, es el representante de Suiza y vicepresidente del programa de investigación y desarrollo sobre gases de invernadero de la Agencia Internacional de la Energía. Kaarstad, asesor de investigación en el área de energía y medio ambiente de la compañía noruega de gas y petróleo Statoil, participa en el proyecto de inyección de dióxido de carbono en el yacimiento Sleipner del mar del Norte.

120 grados para liberar el CO_2. Este producto gaseoso se comprime luego, se seca, se hiela, se licua y se purifica (si es necesario); la solución MEA líquida se recicla. La técnica da buenos resultados, pero tiene que mejorar su rendimiento energético si ha de aplicarse a la separación del carbono en gran escala. En este momento, sólo hay unas pocas centrales térmicas que capturen el dióxido de carbono de sus gases de escape; una de ellas, la construida por ABB en Shady Point. Este CO_2 se vende luego para usos comerciales, como la congelación de pollos o la preparación de bebidas carbónicas.

Otras aplicaciones del dióxido de carbono capturado ofrecen diversos beneficios. El metanol se utiliza, incluso ahora, como combustible menos contaminante. Su obtención a partir del CO_2 capturado y del hidrógeno extraído de fuentes exentas de carbono sería más costosa que la producción a partir del gas natural, la práctica actual. Pero al reutilizar el dióxido de carbono —y asignarle un valor de mercado— este procedimiento debería reducir las emisiones totales, fomentar el recorte de costes en los procesos de captura del CO_2 y ayudar a iniciar la transición hacia el empleo habitual de combustibles más limpios.

Técnicos, políticos y la sociedad entera han de admitir que el carbón, el petróleo y el gas natural siguen siendo fuentes de energía importantes, incluso en un mundo preocupado por los riesgos de cambio climático. Contamos ya con la técnica básica para utilizar estos productos de una manera respetuosa con el entorno. El equipo actual para capturar el CO_2 emitido por centrales térmicas elevaría del 50 al 100 por ciento los costes de generación de la electricidad. Mas como el proceso de separación no afecta al coste de la transmisión y distribución de la energía (fracción apreciable de la factura del consumo eléctrico), los precios de suministro al usuario aumentarán menos, entre el 30 y el 50 por ciento. La investigación de técnicas de confinamiento más eficaces debería conseguir ulteriores reducciones de costes.

¿Qué tiene que ocurrir para que la separación del carbono sea una práctica habitual? En primer lugar, es preciso comprobar la viabilidad de los lugares de almacenamiento propuestos. Seguidamente, la industria y el gobierno han de patrocinar la demostración de estas técnicas a escala amplia. Por último, necesitamos refinar la técnica para reducir los costes de la separación del dióxido de carbono en las centrales térmicas. El proyecto Sleipner ha demostrado que la separación del carbono constituye una opción realista para reducir las emisiones de CO_2 cuando existe un incentivo económico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Sitio Web sobre energía y cambio global del grupo abb: www.abb.com/ (clic en "Environment" y luego en "Energy and Global Change").

Sitio Web del Programa de Investigación y Desarrollo sobre gases de invernadero de la iea: www.ieagreen.org.uk/.

Sitio Web del Laboratorio de Energía del M.I.T.: web.mit.edu/energylab/www.

Sitio Web de Statoil: www.statoil.com (para información sobre la zona de Sleipner, consultar www.statoil.com/ statoilcom/svg00990.nsf.ealias/Sleipner).

Sitio Web de la Oficina de energía fósil del Departamento de Energía de EE.UU.: www.fe.doe.gov/coal_power/sequestration/.

Sitio Web de la Oficina de la Ciencia del Departamento de Energía de EE.UU.: www.sc.doe.gov/production/ober/carbseq.html.

Matemáticas y cosmología en el Renacimiento

Jerónimo Muñoz intervino, a través de su docencia, observaciones y obra escrita, en el debate astronómico que terminó con el hundimiento de la cosmología tradicional y preparó el terreno para la nueva física de Kepler y Galileo

Víctor Navarro Brotóns

En el mes de noviembre de 1572 apareció, en la constelación de Casiopea, una nueva estrella. Nacida de la explosión de una enana blanca, era una supernova de tipo I. Pero eso no podían saberlo astrónomos y filósofos que miraban atónitos semejante fenómeno inesperado, de brillo y color cambiante mientras se dejó ver. Hasta 1574.

Más de cincuenta autores, repartidos por toda Europa, escribieron sobre la nueva estrella. Muchos trabajos se publicaron, traducidos incluso a varios idiomas. Algunos quedaron inéditos. Descripciones y comentarios corrieron en forma de cartas, que terminaron incorporadas en la producción impresa. La nova sirvió de estímulo para el intercambio entre los europeos, estableciéndose una red de relaciones que dieron un gran impulso al avance de la astronomía.

Para unos observadores, el fenómeno debía situarse en la región celeste. Pero discrepaban a propósito de su naturaleza. ¿Se trataba de una estrella o de un cometa? ¿Era o no nueva la estrella? Si se afirmaba que el fenómeno correspondía a una estrella o un cometa supralunar, se ponía en cuestión la doctrina aristotélica de la incorruptibilidad de los cielos, a menos que se la considerara un milagro.

Para otros, la paralaje detectada superaba a la de la Luna. Lo que significaba, en el contexto aristotélico predominante, que se trataba de un "meteoro". Hubo un tercer grupo de observadores que se interesaron por el fenómeno en su posible significado religioso o predictivo de sucesos políticos.

Aunque de valor desigual, los escritos en que se manifestaron esas opiniones ayudaron a crear un clima propicio al debate filosófico y astronómico. La aparición de la nova y la investigación que promovió constituyen un punto de inflexión en el proceso de abandono de la cosmología aristotélica y medieval. Se abre camino la idea de un universo infinito —o indefinido— en física y astronomía.

En España el fenómeno fue seguido también con expectación. Felipe II le encargó a Jerónimo Muñoz, uno de los mejores astrónomos y matemáticos de la época, un informe que recogiera sus observaciones y cálculos, con una interpretación razonada del fenómeno. Muñoz cumplió el mandato real y redactó un estudio detallado.

Muñoz nació en Valencia, en cuya universidad se graduó de bachiller en artes en 1537. Por entonces, el Estudio General, fundado en 1499 y mantenido y regentada por la oligarquía municipal, comenzaba a destacar entre los centros docentes hispánicos. El cuadro de las enseñanzas seguía el esquema normal de las universidades: estudios de gramática y latinidad, de carácter básico; facultad de artes, donde se enseñaba filosofía natural, y las tres mayores de teología, cánones y leyes, y medicina. Contaba, desde 1503, con una cátedra de matemáticas que, en la segunda mitad del siglo y durante algún tiempo, se desdobló en dos.

Muñoz viajó por Europa para completar su formación. Fue discípulo de Oronce Finé, profesor de matemáticas del Colegio de Francia. Estudió también con Gemma Frisius, astrónomo, geógrafo profesor de medicina de la Universidad de Lovaina; hacia 1543 Frisius comenzó a impartir lecciones de matemáticas en su domicilio particular, a las que debió asistir Muñoz. Con estos dos excelentes maestros, Muñoz adelantó en matemática, geografía y cartografía.

Durante el viaje que realizó por Italia, se le reclamó para que enseñara hebreo en la Universidad de Ancona, ciudad de fuerte implantación sefardí expulsa. Según parece había adquirido tal dominio del hebreo que muchos asistentes le tomaron por uno de los suyos. La hipótesis de que era un judío converso no puede descartarse.

Tras su regreso a Valencia, Muñoz se dedicó a la enseñanza privada de

1. EN EL MES DE NOVIEMBRE DE 1572 se hizo visible en la constelación de Casiopea una nueva estrella, de la que da fe esta ilustración extraída de la *Dialexis* de Thaddaeus Hagecius. Hoy sabemos que se trataba de una supernova de tipo I. Debajo de la estrella 11 se incluye la nova formando casi un rombo con las estrellas 2 (en la espalda), 4 (a su lado) y 12 (encima). Hagecius fue astrónomo-astrólogo, botánico, médico personal de los emperadores Maximiliano II y Rodolfo II. Fue también corresponsal de Jerónimo Muñoz, con quien discutió acerca de las observaciones y conclusiones sobre la posición y naturaleza de la supernova. En su *Dialexis* Hagecius incluyó las observaciones de Muñoz, que comparó con las suyas.

matemáticas. En 1563 fue nombrado catedrático de hebreo del Estudio General. Dos años después, unió a esta cátedra la de matemáticas. Deseando mayor desahogo económico, aceptó una oferta de la Universidad de Salamanca, donde desempeñó las cátedras de matemáticas y hebreo. Murió en 1592.

En Valencia explicó aritmética, geometría y trigonometría, óptica geométrica o perspectiva, astronomía y sus aplicaciones a la navegación, instrumentos de astronomía, geografía y astrología. Aunque Muñoz publicó muy pocas obras, sobre esas materias se conservan manuscritos autógrafos o copias de sus discípulos en bibliotecas de Salamanca, Barcelona, Madrid, Munich, el Vaticano, Nápoles y Copenhague. La localización y estudio de estos manuscritos ha permitido reconstruir el contenido de las enseñanzas de Muñoz, y demostrar que estas enseñanzas estaban al nivel de las que se impartían en las mejores universidades de la Europa de la época.

En 1566 aparecieron sus *Institutiones Arithmeticae*, que exponían los conocimientos básicos para los cálculos astronómicos, valiéndose de la numeración decimal y sexagesimal, y para avanzar en las restantes disciplinas de su competencia. En geometría, explicó los seis primeros libros de los *Elementos* de Euclides. Comenzaba por la determinación de las nociones de "elemento", "hipótesis", "definiciones", "postulados", etc., a partir del comentario de Proclo al libro I de los *Elementos*. Proseguía la enseñanza de la geometría con numerosos ejemplos y aplicaciones prácticas a la agrimensura, la óptica y la topografía.

En trigonometría, plana y esférica, bebía en los tratadistas de la época. Los manuscritos conservados incluyen tablas de senos, tangentes y secantes. Para el estudio de la óptica geométrica, prefirió a Euclides frente a Pecham, Witelo y otros perspectivistas medievales. La *Optica* de Euclides es la primera exposición completa de una teoría matemática de la visión que nos ha quedado; en sus comentarios y adiciones a la misma, Muñoz pasa revista a la óptica geométrica y fisiológica.

Fue un destacado geógrafo y cartógrafo. El mapa más antiguo que se conoce del Reino de Valencia, incluido por Abraham Ortelium en su atlas *Theatrum Orbium Terrarum*, se levantó a partir de los datos proporcionados por Muñoz, quien no sólo determinó con notable precisión las coordenadas geográficas de muchas localidades, sino que inició la triangulación geodésica del territorio, basándose en las técnicas de Frisius.

La triangulación consistía en la determinación, desde un punto de partida, de las direcciones (ángulos con el meridiano del lugar o de posición) de diversos puntos visibles o estaciones y en la repetición de

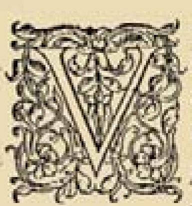
20 DIALEXIS

IMAGO CASSIOPEÆ.



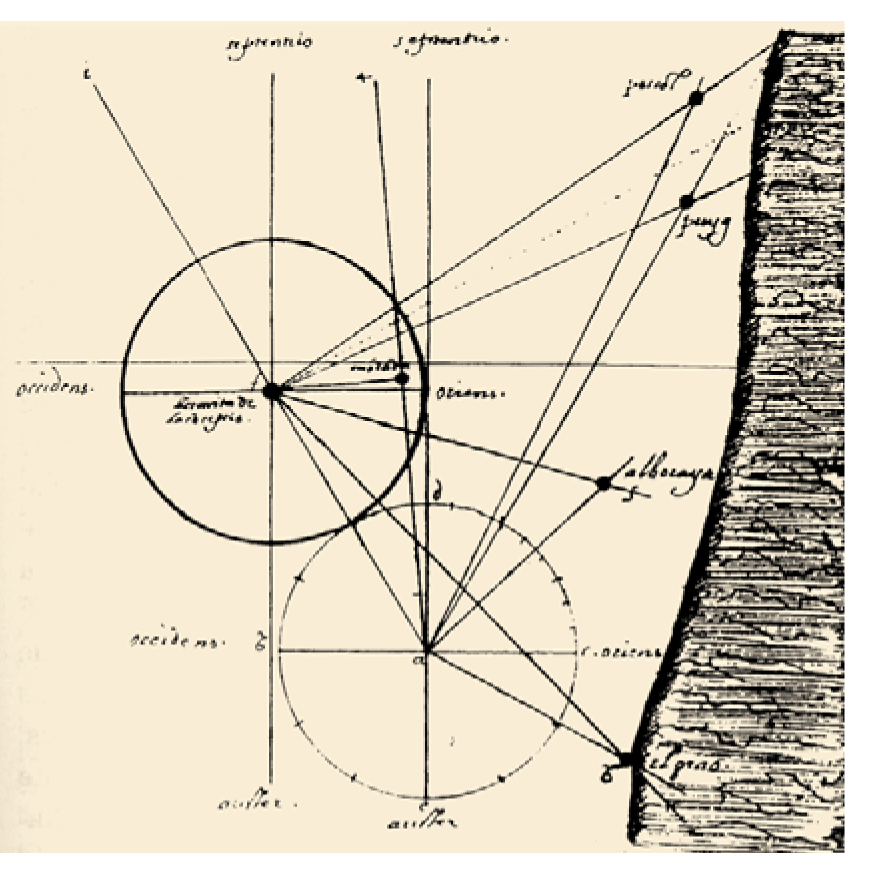
DE NOVA STELLA. 21

Recitantur variæ opiniones de hac Stella, eædémque diluuntur. Cap. 2.

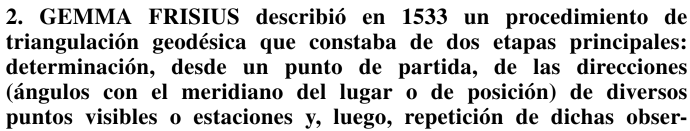

VARIÆ opiniones sunt sparsæ de hac noua stella publicè æditis libellis, multorúmque animi varietate illa opinionum in diuersum adeo distracti, vt insigne hoc prouidentiæ Dei opus penè in despectũ abierit. Ego igitur recitatis aliorum opinionibus, ad singulas respondere, errores reprehendere, & arrogantes quorundam voces retundere sum conatus, non quidem studio contradicendi (à quo mea natura abhorruit semper) sed veritatis inquirendæ & asserendæ causa: & vt multorum bonas mentes falsa persuasione imbutas, ad amplectendam & iusta possessione retinendam veritatis cognitionem adducerem: vtque præclarum hoc prouidentiæ Diuinæ munus balbutiendo celebrius redderem, ne id vnquam è memoria hominum elaberetur.

Sunt qui hanc Stellam, non nouam, sed veterem, ac à primæua rerum origine conditam, adeóque illam ipsam, quæ est numero vndecima, in imagine Cassiopeæ esse contendunt: quam opinionem primus omnium sparsit tueriq; aggressus est Hannibal Raimundus Veronensis, ac plurimos sua opinione infatuauit, libello de ea Stella edito: in quo tamen præter nugamenta & ineptias quas affert, omnes alios diuersum sentientes, nimis audacter & præsumptuosè erroris arguere non veretur. Rationes igitur sui instituti examinabimus libertate Philosophica. Harum pri- Raimundi opinio refutatur.

C 3



DE REGIONVM ET LOCO.
peragrare si tantū videre, singulos vero & littora facile descriptis oppidis secundum suas hinc distantias ortus & exitus habebuntur.
Hæc figura caput præcedens demonstrat ad oculum.



2. GEMMA FRISIUS describió en 1533 un procedimiento de triangulación geodésica que constaba de dos etapas principales: determinación, desde un punto de partida, de las direcciones (ángulos con el meridiano del lugar o de posición) de diversos puntos visibles o estaciones y, luego, repetición de dichas observaciones y estimación de los ángulos desde las estaciones dirigiendo la visual a la primera y a las otras. Todo ello permitía trazar en un papel una red de triángulos mediante la intersección de las líneas correspondientes a las visuales de las estaciones. Midiendo la longitud de una distancia o línea base, se podía obtener las otras distancias, estimar las coordenadas geográficas y levantar el mapa de la región. En la figura derecha puede verse el esquema de la triangulación según Gemma Frisius. El dibujo de la triangulación de Muñoz (*izquierda*) procede de una copia de su tratado de *Astronomía y Geografía* realizada por un discípulo suyo y conservada en la Bayerische Staatsbibliothek.

dichas observaciones y estimación de los ángulos desde estas estaciones dirigiendo la visual a la primera y a las otras; todo ello permitía trazar en un papel una red de triángulos mediante la intersección de las líneas correspondientes a las visuales de las estaciones. Midiendo la longitud de una distancia o línea base, se podía conocer todas las otras distancias, estimar con bastante aproximación las coordenadas geográficas de los lugares y trazar el mapa de la región.

Explicaba también Muñoz cómo construir un globo terráqueo, mediante el dibujo de husos, así como los recursos matemáticos para representar una esfera en un plano. Enseñaba a trazar las proyecciones de Ptolomeo y otras propuestas en su época para abarcar en el plano del dibujo el nuevo *ecumene* (mundo conocido), ampliado a 360º.

Para regiones particulares no muy extensas, Muñoz sugería una proyección trapezoidal, construida atendiendo a la proporción entre la longitud de los paralelos superior e inferior del mapa y la longitud del ecuador, para tener en cuenta la convergencia de los meridianos. Se sirvió de esta proyección para dibujar el magnífico mapa de la Península que figura en las copias manuscritas que se conservan de sus lecciones de geografía impartidas en Valencia.

Pero el grueso de los manuscritos corresponden a astronomía, cuya enseñanza en la universidad tardomedieval se iniciaba con las lecciones *de sphera*, es decir, una síntesis esquemática de la teoría aristotélica de los elementos y las dos regiones, celeste y terrestre: movimientos de las esferas celestes, elementos de astronomía esférica (círculo equinoccial, zodíaco, etc.), forma de la Tierra y teoría de las zonas y de los climas en que se dividía el globo.

La doctrina sobre la Tierra se complementaba con la *Theorica planetarum* (teoría o modelos del movimiento de los planetas). Se revisaban los aspectos esenciales de las teorías del movimiento del Sol, la Luna, los nodos y los planetas, de acuerdo con la tradición ptolemaica. Dado que este texto apenas incluía parámetros numéricos, la enseñanza se reforzaba con el uso de tablas, generalmente las llamadas *Alfonsíes*. También se enseñaba el uso de algún instrumento, preferentemente el astrolabio. La astronomía aplicada introducía al alumno en el cómputo del tiempo, el calendario y la astrología.

Ese esquema medieval —esfera, modelos planetarios, instrumentos y tablas y aplicaciones— se mantuvo en las universidades en el siglo XVI. Obviamente, el contenido de las enseñanzas y el nivel de profundización

VICTOR NAVARRO BROTONS es catedrático de historia de la ciencia en la Universidad de Valencia y trabaja en el Instituto López Piñero de la capital levantina. Ha dedicado una parte importante de su actividad científica a reconstruir la ciencia española del Renacimiento y Edad Moderna desde una perspectiva comparada.

dependía mucho del profesor que las impartía, del interés del alumnado y de los textos en los que basaba su enseñanza. Así, en la Universidad de Salamanca, en los estatutos de 1561 se establecía:

> "En la Cátedra de Astrología, el primer año se lea en los ocho meses Esfera y Teóricas de planetas, y unas Tablas; en la sustitución, Astrolabio.
>
> "El segundo año, seys libros de Euclides y Arithmética, hasta las raizes cuadradas y cúbicas, y el Almagesto de Ptolomeo, o su Epítome de Monte Regio, o Geber, o Copérnico, al voto de los oyentes; en la sustitución, la esphera.
>
> "El tercer año, Cosmographia, o Geographía, un introductorio de Iudicaria y Perspectiva, o un instrumento al voto de los oyentes, en la sustitución, lo que paresciere al cathedrático comunicado con el Rector."

Como puede verse, al nivel avanzado de los estudios de astronomía se recomendaba el texto más importante de astronomía de la antigüedad, el *Almagesto* de Ptolomeo, un tratado de astronomía matemática altamente técnico. Y como alternativas se sugería el magnífico resumen del *Almagesto* realizado por Regiomontano, astrónomo destacado del siglo XV, el importante comentario de Geber (Ŷābir b. Aflaḥ) o el *De revolutionibus* de Copérnico, "al voto de los oyentes".

Salvo breves referencias a la doctrina de los elementos y a la posición de la Tierra en el centro del mundo, los profesores de astronomía no solían entrar a discutir las cuestiones propiamente cosmológicas, como la naturaleza de los cielos o las causas de los movimientos celestes. La física celeste era coto de la filosofía natural. Lo que no significa que los astrónomos fueran indiferentes, o "instrumentalistas", en cuanto a la verdad física de las teorías astronómicas, ni a las cuestiones cosmológicas; tampoco, que hubiera una separación total entre las disciplinas.

Los *Seis libros acerca de las revoluciones de las esferas celestes* (*De revolutionibus orbium coelestium libri VI*) que Copérnico publicó en 1543 coronan el trabajo de un astrónomo empeñado en revisar la astronomía matemática establecida por Ptolomeo. Su defensa del movimiento de traslación de la Tierra —que la convertía en un planeta más— terminó por desmoronar la cosmología medieval. En la nueva física, firmamento y tierra están sometidos a las mismas leyes.

Aunque la parte técnica de la obra fue muy apreciada por sus coetáneos y se adoptaron algunos de sus procedimientos, esquemas o técnicas de cálculo, no abundaron los seguidores de la teoría heliocéntrica. De hecho y si incluimos a Galileo y a Kepler, que entraron en escena en los últimos años del siglo XVI, con todo rigor no superan la decena.

Además, los debates astronómico-cosmológicos no se limitaron al heliocentrismo, sino que abarcaron también la naturaleza de los cielos y las causas de sus movimientos, existencia y composición de las esferas celestes, génesis, posición y constitución de los cometas y otros fenómenos celestes —como la nova de 1572—, las influencias celestes y la legitimidad de la astrología.

La nova de 1572 y el cometa de 1577 aumentaron la confianza de los astrónomos en su propia capacidad para discutir y aportar datos que esclarecieran cuestiones cosmológicas, amén de derruir la barrera que







3. ENSEÑANZA de la astronomía y de las materias relacionadas con ella en las universidades del siglo XVI. Se recomendaba o exigía la instrucción en el uso de algún instrumento, preferentemente el astrolabio plano. Consistía en una proyección estereográfica, una proyección plana de la esfera celeste. Gemma Frisius, hacia mediados del siglo XVI, describió un tipo de astrolabio, que llamó "católico", es decir, universal, porque valía para todas las latitudes. Se basaba en la azafea de Azarquiel. Un discípulo de Frisius, el español Juan de Rojas, describió un astrolabio universal en el que el centro de proyección se sitúa en el infinito, sobre una perpendicular al plano del coluro de los solsticios, que sirve de centro de proyección. En esta proyección los paralelos se convierten en líneas rectas y los meridianos en semielipses. Muñoz enseñaba la construcción y usos de este tipo de astrolabio en sus clases en Valencia y Salamanca. Imágenes del astrolabio con lámina universal (proyección de Rojas) conservado en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología y procedente de los Países Bajos.



Libro del nueuo Co
META, Y DEL LV-
gar donde se hazē; y como se vera por las
Parallaxes quan lexos estan de tier-
ra; y del Prognostico deste:
Compuesto por el Maestro Hieronymo Muñoz
Valenciano, Cathedratico de Hebreo y Mathe-
maticas en la Vniuersidad de Valencia.

EN VALENTIA,

Impresso con licencia en la officina de Pedro
de Huete, en la plaça de la hierba. 1573.

TRAICTE' DV
NOVVEAV COMETE, ET DV LIEV
OV ILS SE FONT, ET COMME IL SE
verra par les Parallaxes combien ils sont loing
de la terre, & du Pronostic d'iceluy.

Composé premierement en Espagnol, par M. Hie-
ronyme Mugnoz, Professeur ordinaire de la lan-
gue Hebraïque & des Mathematiques, en l'Vni-
uersité de Valence.
Et depuis traduict en Françoys par Guy le Fe-
ure de la Boderie.

Plus, vn Cantique sur ladicte Estoille en Ap-
parence lumineuse.

A PARIS,
Chez Martin le Ieune, rue sainct Iean de La-
tran, à l'enseigne du Serpent.
M. D. LXXIIII.
AVEC PRIVILEGE.

4. PORTADA DEL LIBRO de J. Muñoz dedicado a la supernova de 1572 y de la traducción francesa. Entre los observadores de la supernova, el español fue uno de los que determinaron con mayor precisión su posición relativa a las estrellas de Casiopea y sus coordenadas ecuatoriales y eclípticas. Escribió este libro a raíz de una petición de Felipe II.

separaba la astronomía de la física. Los trabajos y debates subsiguientes agudizaron la crisis de la cosmología tradicional y prepararon el terreno para la aceptación del movimiento de la Tierra y la construcción de una *scienza nuova*.

Suele asociarse la nova de 1572 al nombre de Tycho Brahe, a quien se le debe el estudio más amplio, detallado y preciso sobre el fenómeno. No fue el único, ni el más influyente. Hacia la nova dirigieron su mirada Thomas Digges, Thaddaeus Hagecius (Tadeáš Hájek), Cipriano Leowitz, Michael Maestlin, Cornelius Gemma (hijo de Gemma Frisius), Elias Camerarius y Hannibal Raimondus. En España, el fenómeno fue seguido con expectación, entre otros, por Bartolomé Barrientos, que la consideró un cometa y la situó en la región sublunar, y Juan Molina de la Fuente, quien sospechaba su carácter de estrella fija pese a denominarla cometa.

Pero el mejor estudio realizado en nuestro país y óptimo entre los europeos sobre la nova de 1572 lo acometió Muñoz. Publicó sus resultados y conclusiones en el *Libro del nuevo cometa*, un opúsculo de 62 páginas. Arranca con una dedicatoria al rey, en la que recuerda el ambiente de expectación que existía dentro y fuera de la Corte acerca del fenómeno, su naturaleza y significado. Muchas, cuenta, eran las cartas que había recibido para que se pronunciara. En el cuerpo respondía, muy en particular, a la solicitud del rey "instigador para que escribiera el libro acerca del cometa", como escribiría a su amigo y colega de Viena Bartholomaeus Reisacherus. Se proponía mostrar "por razones naturales y demostraciones geométricas" la naturaleza celeste del fenómeno, contra la creencia, basada en la doctrina aristotélica, según la cual el "cielo es de su naturaleza incorruptible". Para Muñoz, era precisamente la fe y el crédito que muchos concedían a Aristóteles lo que hacía que "viendo aún por razones naturales sacadas de las propiedades de este cometa, que él está en el cielo, y tiene naturaleza o parentesco con las estrellas fijas, no han podido entender lo que con los ojos pudieran ver".

Llamó "cometa" a la supernova, no sin hacer hincapié en que se trataba de uno peculiar, que por su movimiento más parecía una estrella. La razón de incluir el fenómeno entre los cometas tiene que ver con su deseo de dar una interpretación de la génesis de la nova en términos de causas naturales, en coherencia con la tradición astrológica. Por contra, la mayoría de quienes la reputaron estrella y aceptaron su naturaleza celeste, recurrieron al poder absoluto de Dios sobre la creación, poder omnímodo capaz de suspender el curso normal de las cosas. Tal fue la interpretación de Cornelius Gemma, Digges, Brahe o Hagecius.

De cuantos trataron de explicar la aparición de la estrella por un proceso "natural", Muñoz fue uno de los que mejor supieron inferir las implicaciones cosmológicas del fenómeno. Una y principal: resultaba harto difícil mantener la creencia en la incorruptibilidad de los cielos y hacerla compatible con la aparición de la nova. En su *Libro sobre el nuevo cometa* Muñoz concluyó que "los cometas que duran mucho y tienen notable movimiento no se hacen en el aire" y que los "cielos y estrellas no son quintaesencia

[materia especial de que se suponía constaba el firmamento], sino que tienen deudo y parentesco con los [cuatro] elementos".

La ubicación del fenómeno a una distancia de la Tierra superior a la de la Luna la fundó Muñoz en la nula paralaje observada. La paralaje es una forma de triangulación. Por paralaje de altura se entiende la diferencia entre dos ángulos, el que forman con la vertical las líneas dirigidas a un astro desde el punto de observación y el que subtienden con dicha recta las líneas dirigidas desde el centro de la Tierra; era el recurso habitual de los astrónomos para estimar las distancias a la Tierra. La ausencia de paralaje implicaba que el cuerpo estaba muy por encima de nuestro satélite, cuya paralaje había sido estimada ya por Ptolomeo en la antigüedad en más de un grado (paralaje horizontal).

Basado en el testimonio de muchos observadores, dedujo que a principios de noviembre "no había este cometa en el cielo", sino que la nueva estrella apareció el 11 de noviembre, señalando la concordancia de esta fecha con las teorías astrológicas de Albumasar. Anotó su magnitud aparente, ubicación en el cielo, brillo y parpadeo. Calculó las coordenadas de la estrella y sus distancias angulares a las tres estrellas "mas altas y mayores de la constelación de la Casiopea" con las que "hacía una figura casi rombo". Las distancias estimadas fueron bastante precisas.

El *Libro del nuevo cometa* fue traducido al francés por Guy Lefèvre de la Boderie. Su contenido se difundió también a través de la correspondencia que mantenía con Reisacherus y Hagecius. Este último le facilitó a Brahe cartas de Muñoz sobre la nova, que Brahe copió y usó en *Astronomiae Instauratae Progymnasmata*. Brahe conoció, además, el *De naturae divinis characterismis* (1575) de Cornelius Gemma, donde se aludía con cierto detalle al libro del español. Gemma comparó sus observaciones con las de Muñoz y criticó que se tratara de un cometa. Según Cornelius Gemma no era cometa ni estrella, sino un *sydus novus,* un cuerpo especial de creación directa.

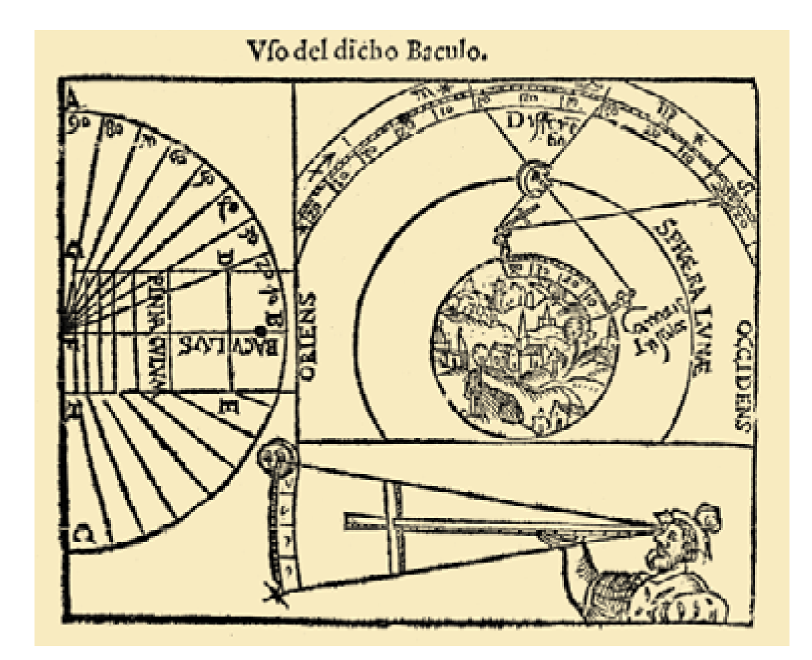
Hagecius, en su obra dedicada a la nova, reprodujo un fragmento de la carta de Muñoz a Reisacherus. Comentó y comparó los trabajos de aquél con los suyos propios. Hubo más. Las ideas de Muñoz continuaron citándose a lo largo del siglo XVII, entre otros por William Gilbert y Galileo. En España, Diego Pérez de Mesa, Antonio Núñez Zamora y Juan de Victoria defendieron posturas similares a las suyas.

Libro del

¶ Declarase el capitulo passado con figuras.

A, es el centro dela tierra. bcd. la mitad dela tierra que esta encima hazia al Zenith, que es x. El Polo ß. El puncto c, es la cara dela tierra, de donde mira el Mathematico los cuerpos n,o,α,p,k. El semicirculo ikl, es la buelta que da el cuerpo k. El semicirculo mnoαpq, es la buelta que dan dichos cuerpos. El semicirculo exf es la mitad del cielo estrellado: cuyo diametro Horizontal es eaf Si el ojo estuuiesse en el centro a, veria el semicirculo exf. La raya gch. es Horizonte visible para el ojo, puesto en el puncto c, del qual puncto solamente veria el arco gxb, que es menor que el semicirculo exf. El verdadero lugar del cuerpo n, es el puncto s, y del cuerpo o, es el puncto u, y del cuerpo α, el verdadero y apparẽte lugar es el puncto x, donde no se engaña.

5. EL PROCEDIMIENTO HABITUAL para estimar las distancias de los cuerpos celestes a la Tierra es a través de la determinación de la paralaje. La paralaje (de altura) es la diferencia de los ángulos que forman con la vertical las líneas dirigidas a un astro desde el punto de observación y desde el centro de la Tierra. La ausencia de paralaje sensible, con los instrumentos de la época, implicaba que el cuerpo estaba muy por encima de la Luna, cuya paralaje había sido estimada ya por Ptolomeo en más de un grado (paralaje horizontal; actualmente la paralaje ecuatorial horizontal de la Luna se estima en 57' 2", 608). En esta figura, del *Libro del nuevo cometa* de Muñoz, se explica la variación de la paralaje con la distancia: el ángulo que forman las líneas trazadas desde la superficie y desde el centro de la Tierra al objeto en *K* es mayor que el que forman las líneas correspondientes al objeto en *P*. Al no hallar ninguna paralaje sensible para la nueva estrella, concluyó que debía de estar muy por encima de la Luna: es decir, era un fenómeno celeste.







6. PARA DETERMINAR LOS ANGULOS entre dos estrellas o entre dos astros cualesquiera solía emplearse el "radio astronómico", conocido con diversos nombres: báculo de Jacob, *virga visoria*, radio astronómico, *baculus astronomicus*, *radius visorius*, ballestilla, etcétera. Se usaba también en agrimensura y topografía, para medir alturas o distancias, así como ángulos de posición en las triangulaciones geodésicas. Fue el instrumento preferido por los navegantes para estimar la altura de los astros en el mar. Muñoz se valió de una ballestilla, que él llama radio astronómico, para estimar las distancias entre la nova y las estrellas de Casiopea. La ballestilla aquí reproducida se conserva en el Museo Nacional de Ciencia y Técnica y la fabricó Walter Arsenius en 1563, según las instrucciones de Gemma Frisius, que introdujo pínulas móviles en el transversario. El dibujo sobre el uso de la ballestilla figura en la *Cosmographia* de Pedro Apiano publicada con adiciones de Gemma Frisius.

Pero las críticas que vertió contra Aristóteles no fueron bien recibidas. En carta a Reisacherus se quejaba de que el rey no le había dado ni las gracias y añadía "como dice Plinio, no es España ni mucho menos observadora de astros, ni colaboran diligentemente con los matemáticos, sino sólo con las artes mercantiles." Por todo ello, decidió no publicar sus otros escritos y atenerse a la máxima de Horacio: "Ni las alegrías son sólo para los ricos, ni vivió mal quien en vida y en muerte pasó inadvertido."

Se valió de la nova de 1572 para poner en cuestión la naturaleza quintaesencial de los cielos y su incorruptibilidad, uno de los postulados clave de la cosmología aristotélica. Si antes de que apareciera la novedad admitía ya la posibilidad de cambios en el firmamento, es evidente que el fenómeno le afirmó en su idea. Contra la objeción de quienes aducían que no era un cuerpo celeste, sino un meteoro instalado en el mundo sublunar, replicaba: "No han podido entender lo que con los ojos pudieran ver", por culpa de los prejuicios que condicionan la percepción e interpretación de los fenómenos.

En un manuscrito autógrafo de 1568, donde se recogen las lecciones extraordinarias que impartió en la universidad ese verano, leemos entreveradas cuestiones cosmológicas y teológicas en un comentario del segundo libro de la *Historia Natural* de Plinio, quien se ocupa allí del mundo en general, del cielo, de los astros (estrellas, Sol, Luna y planetas), de los fenómenos meteorológicos y finalmente de la Tierra. La glosa se enmarca en la tradición estoica. Todo el universo, desde la Tierra, instalada en el centro, hasta sus confines, estaba lleno de aire, que, además, impregnaba todas las cosas del mundo y servía de conexión entre ellas.

Guardan relación con lo anterior sus *Comentarios a Alcabitius*, un texto de astrología relacionado también con sus clases. Compara aquí el aire cósmico con el espíritu que se difunde desde el corazón para vivificar el cuerpo. Niega, pues, la existencia de la esfera de fuego, que serviría de frontera entre dos regiones, la sublunar y la celeste. También rechaza cualquier otro tipo de discontinuidad brusca en los cielos, como la que representarían las esferas u orbes celestes.

El cosmos de Muñoz no tiene dimensiones precisas. Pequeño y finito, termina allí donde acaba el aire, que se va enrareciendo progresivamente hasta desvanecerse. Su límite superior carece de forma definida; más allá es posible que exista un inmenso vacío.

En la mente de Muñoz, los planetas se mueven, gracias a su propia fuerza o naturaleza, por el aire cósmico, como los peces por el mar o los pájaros por el aire que rodea a la Tierra. No los arrastran los orbes. De idéntica manera proceden las estrellas, lo que significa que rechaza la

ESTRELLA	CLARK Y STEPH.	BRAHE	DIGGES	HAGECIUS	MUÑOZ
2 (α Cas.)	7° 49,1'	7° 50,5'	7° 47'	7° 47'	7° 50'
12 (β Cas.)	5° 20,8'	5° 19,0'	5° 15,0'	5° 15'	5° 20'
4 (γ Cas.)	4° 58,4'	5° 02,0'	4° 58'	5° 3'	5° 10'

7. DISTANCIAS ANGULARES entre la nova y las estrellas de Casiopea

existencia de una esfera portadora de las fijas. Los cielos son corruptibles y los planetas y estrellas contienen en su composición elementos y cualidades análogas a las terrestres, aunque en estado más puro. Los cometas se forman en el firmamento y son, por tanto, cuerpos celestes.

Puesto que los planetas no se mueven arrastrados por esferas, sino libremente por el aire, entiende que la única explicación plausible de los dos movimientos aparentes básicos, el común a todos de oriente a occidente y el propio de cada uno de occidente a oriente, es que recorran una sola trayectoria, que los lleva de este a oeste. Este curso planetario sería algo más lento que el de las estrellas fijas; tanto más lento cuanto más cerca esté el planeta de la Tierra, ya que el aire adquiere mayor densidad en idéntica proporción y, por tanto, ofrece más resistencia. El movimiento de los astros no es uniforme y procede según trayectorias irregulares, de polos variables, que Muñoz llama espiras.

Reiteró ese pensamiento en su obra más ambiciosa, la traducción glosada del *Comentario al Almagesto* de Theón de Alejandría. En esta obra, con la que pretendía revisar toda la astronomía ptolemaica, Muñoz no rehuyó las cuestiones cosmológicas y propuso una teoría del movimiento planetario como la apuntada en los *Comentarios a Plinio*. Se limitó a los rasgos generales y cualitativos. No podía ser de otra manera, ya que el intento más serio de elaborar una astronomía matemática basada en la hipótesis del retraso del Sol y los planetas con respecto al movimiento diurno de las estrellas, a saber, el de Alpetragius, había fracasado desde el punto de vista cuantitativo y predictivo. De ahí que Muñoz permaneciera fiel a los modelos ptolemaicos, igual que los astrónomos competentes de su época.

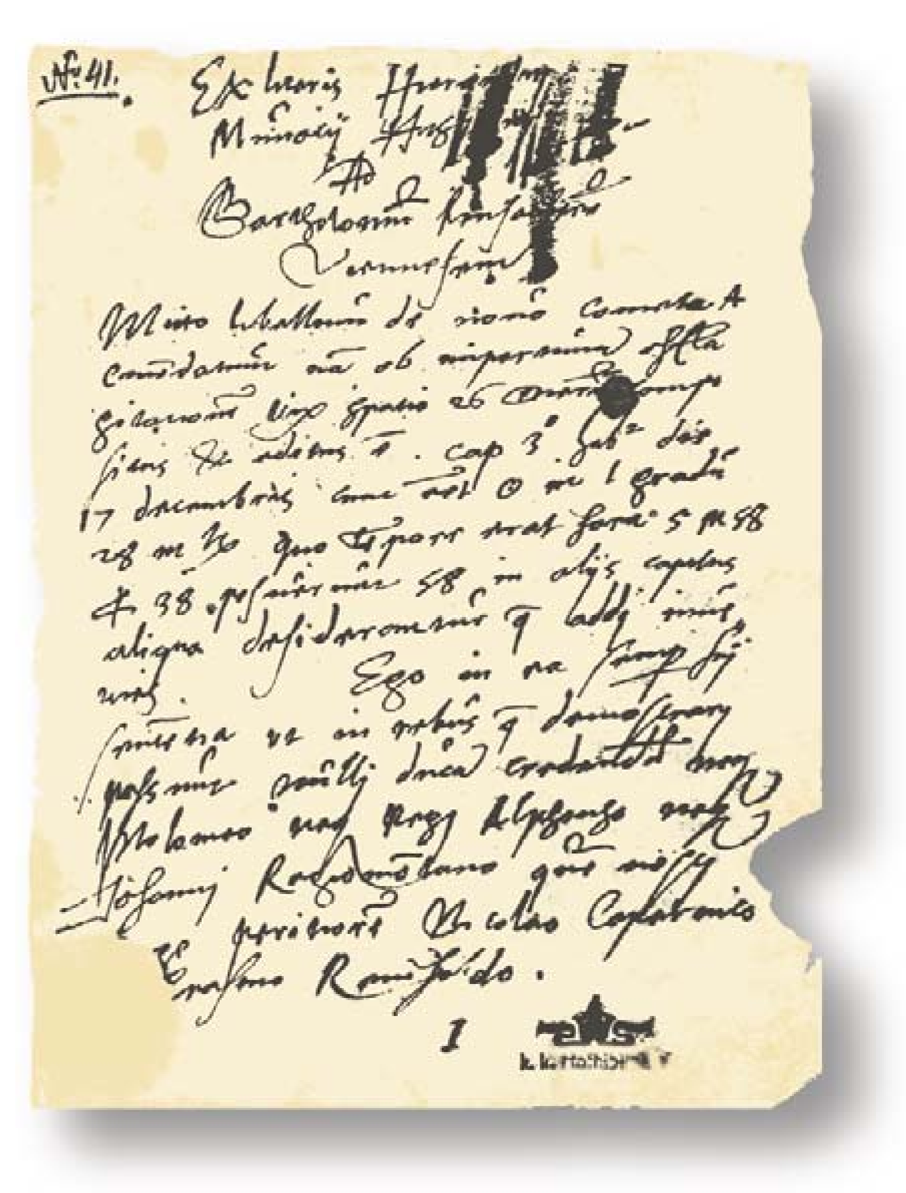
Nuestro autor no fue, desde luego, el primero en poner en cuestión doctrinas fundamentales de la cosmología vigente. Jean Pena publicó en 1557 una traducción latina de la óptica de Euclides acompañada de un largo prefacio “sobre el uso de la óptica”, donde afirmaba que este arte podía resolver importantes cuestiones acerca de la materia celeste, así como el orden, lugar y movimiento de los cuerpos celestes.

Según Pena, el medio en que se mueven los planetas no es otra cosa que el mismo aire que respiramos en la Tierra, pues si el cielo estuviera formado por un elemento distinto, y además diferenciado en una serie de orbes o esferas contiguas portadoras de los planetas, las apariencias celestes serían necesariamente muy distintas de como son.

Pena cita, en particular, a Gemma Frisius, para quien las distancias entre astros observadas en cualquier altura se mostraban siempre iguales. Lo que, de ser cierto, anulaba la refracción astronómica y la continuidad entre el medio sublunar y el celeste. Para Pena, por tanto, no había esfera de fuego, ni orbes sólidos quintaesenciales que arrastraran los cuerpos, también sólidos, de los planetas. En cuanto a los cometas, dice que algunos se mueven más lentos que la Luna y deben situarse por encima de ella. Sobre la cola, se vale de la teoría de la refracción de los rayos solares, adelantada también por Gemma Frisius.

Para Pena, el espacio donde desarrollan los planetas sus movimientos regulares está lleno de pneuma, ese “espíritu animal” postulado por los estoicos y difundido por la naturaleza y que en nada se distingue del aire que respiramos.

Anteriormente a Pena, Jacob Ziegler, en su *Comentario a Plinio*, había afirmado que la región por la


Nº 41. Ex literis [illegible]
Munoz [illegible]
Ad
Bartholomeum [illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible] cap 3. [illegible]
17 decembris [illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
Ego in ea [illegible]
[illegible]
[illegible]
Ptolomeo [illegible]
Joanni Regiomontano [illegible]
[illegible] Nicolao Copernico
Erasmo Reinholdo.
1

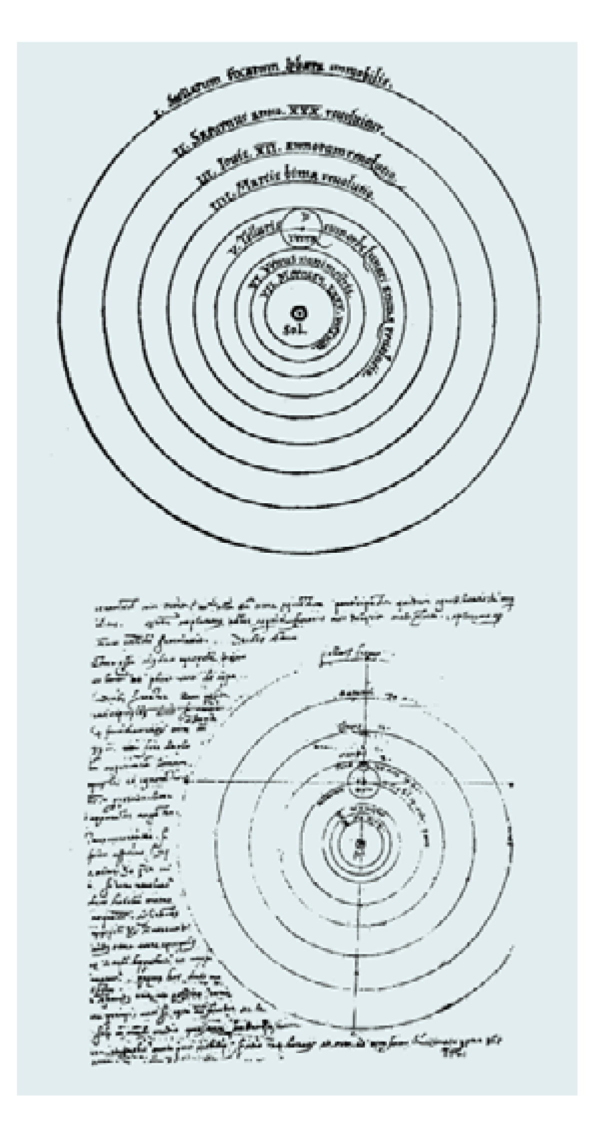
8. LOS TRABAJOS y conclusiones de Jerónimo Muñoz sobre la supernova se difundieron también a través de la correspondencia que mantenía con astrónomos europeos. Esta carta es la copia de la que envió a Bartholomaeus Reisacherus, médico y astrónomo de Viena. En ella Muñoz le comunica que le ha enviado un ejemplar del *Libro del nuevo cometa* con algunas correcciones, ya que debido a una “inoportuna petición” fue compuesto y editado en apenas 26 días. Según parece, la letra de la carta es de Tycho Brahe, quien la copió a partir del ejemplar que le transmitió Hagecius.

que se desplazan los planetas era fluida, aunque él prefería llamarla “éter” y no “aire” como Plinio. Ziegler, además, criticó la doctrina de las esferas celestes sólidas que portaban a los planetas, valiéndose de argumentos ópticos: si el cielo por el que se mueven los planetas, razonaba, fuera denso, sería oscuro y la luz que procede de los astros más alejados nos llegaría muy amortiguada.

Por los años en que Muñoz redactaba sus *Comentarios a Plinio*, Roberto Belarmino exponía en Lovaina ideas cosmológicas contrarias a la tradición aristotélica. Afirmaba el jesuita que la Tierra era esférica, inmóvil y centro del universo. Desde este centro, los cielos como un todo se dividían en tres partes: el cielo aéreo, el de los astros y el empíreo. El segundo cielo no era sólido, ni impenetrable, ni inmutable, ni constaba de quintaesencia subdividida en esferas. Constituiría una suerte de océano de materia penetrable, compuesta de fuego; considerado en su globalidad, era estacionario, es decir, no se movía alrededor del universo. En consecuencia, los astros no cursaban arrastrados por esferas u orbes, sino por sí mismos, como peces por el mar o aves por el aire. Belarmino y Muñoz interpretaron el movimiento aparente de oeste a este de los planetas según la teoría del retraso.

Belarmino se apoyaba explícitamente en la Biblia y los Padres de la Iglesia, que le facultaban para separar la “física mosaica” (la del Antiguo Testamento) de la cosmología aristotélica. Y ello sin dejar de reseñar la coincidencia de sus propias ideas con las de los platónicos, los estoicos y otras escuelas.

Le había precedido en esa misma estela Agostino Steuco, exégeta bíblico y autor de una *Cosmopeia* (1535). Bajo la influencia del neoplatonismo y apoyándose en la interpretación por San Basilio de las aguas celestes como nubes y del firmamento como aire, sostenía que la materia del cielo era fluida, “extensión y expansión”, ocupando todo el espacio entre la Tierra y las esferas fijas.



9. REPRESENTACION del sistema original de Copérnico, comparada con la que figura en la traducción con adiciones de Muñoz de los *Comentarios* de Theón de Alejandría al *Almagesto* de Ptolomeo (Biblioteca Nacional de Nápoles). En la representación copernicana hay nueve círculos para siete nombres; en el de Muñoz, ocho círculos para siete nombres. En *De revolutionibus*, si se desplazan los nombres de la “esfera” de las fijas y de Saturno, Júpiter y Marte hacia el centro, se llega a una configuración que coincide con el que figura en el manuscrito de Copérnico. Pero en tal caso los nombres se refieren a los espacios o partes de esfera entre círculos; es decir, a orbes, no a círculos o “trayectorias”. Pero quedaría el anómalo caso del círculo que atraviesa el círculo de la Tierra. Muñoz, en su dibujo, elimina un círculo, con lo que deja el mundo sin límites. La representación de Muñoz del sistema de Copérnico es la primera conocida realizada por un autor español.

La peor amenaza, el enemigo más insidioso contra el aristotelismo dominante era la multiplicación de las autoridades, el pluralismo doctrinal. Muñoz, en sus *Comentarios a Plinio,* puso en juego, según el gusto de los humanistas, un amplio repertorio de citas de poetas, historiadores, geógrafos, matemáticos y filósofos. Con semejante recurso retórico colocaba en el mismo plano autores de filiación diversa cuyas palabras valdrán lo que valgan sus argumentos. Afirmaba, además, que la cosmología que él proponía se adecuaba mejor que cualquier otra con los postulados de la fe. Lo que no podían decir los seguidores de Aristóteles, Teofrasto y cuantos con ellos defendían la eternidad del mundo.

Pieza central de su sistema es el aire cósmico o, en expresión de Plinio, “el espíritu, que los autores griegos y los nuestros llaman con el mismo término, ‘aire’, algo vital que puede penetrar todas las cosas y que está extendido por todo”. Refuerza esa opinión con referencias a Virgilio, Arato y Manilo; los dos últimos, autores de poemas didácticos de contenido astronómico-astrológico e influencia estoica. Busca, sobre todo, el apoyo de Hipócrates, para así demostrar que su idea sobre la sustancia del cielo “no es nueva, sino antiquísima, aunque algo oscurecida por los comentarios aristotélicos”. Muñoz recurre a las credenciales de veracidad y autenticidad que proporcionan las cosas más antiguas u “originales”: otro tema caro a los humanistas, relacionado con la concepción cíclica de la historia de la cultura humana.

Se esforzó por hallar razones ópticas que respaldasen su cosmología y reprobaran la doctrina de las esferas. Si la materia de los cielos fuera “densa, al modo del vidrio” (*instar vitri aut crystalli*), argumentaba, no se podrían distinguir los cuerpos de las estrellas o los planetas, sino “únicamente los reflejos de sus rayos”, produciéndose una total confusión. A lo que añade que, si los astros se moviesen arrastrados por orbes “sólidos semejantes al vidrio”, todos lo planetas centellearían, “como se demuestra arrojando una moneda en el agua agitada”. Dicho de otro modo, los planetas estarían “sumergidos” en orbes sólidos afectados de diversos movimientos, con lo que la luz procedente de ellos sufriría múltiples refracciones. La tesis de unas esferas u orbes celestes que transportaban a los astros implicaba en ellos una constitución densa y sólida, similar al vidrio. No podían, pues, aceptarla

quienes, como él, consideraban que el firmamento constaba de aire muy enrarecido.

Los medievales apenas debatieron el carácter duro o blando de los orbes. Sólido designaba tridimensionalidad y continuidad, y así se calificaron los cielos. Solidez en el sentido de dureza o tenacidad de los minerales era *a priori* excluida del mundo celeste, ya que se trataba de atributos de cuerpos sublunares corruptibles. Para los medievales una esfera sólida significaba una esfera material, sin que ello implicara necesariamente ningún compromiso con su dureza o blandura.

Antes del siglo XIII, los orbes se suponían fluidos. En esa centuria y en la siguiente se advierte un cambio gradual hacia los orbes sólidos, continuos. En el Renacimiento se asoció solidez a dureza. Brahe sostenía en 1588 que la máquina del mundo no era ningún cuerpo duro e impenetrable compuesto de orbes "como hasta ahora ha sido creído por muchos", sino perfectamente fluido y simple.

A diferencia del éter o *pneuma* elástico de los estoicos, la quintaesencia aristotélica defendida por los medievales poseía la capacidad de contener a los astros. El propio estagirita, al rechazar la idea de astros independientes del éter y libres de todo vínculo, los ubicó, fijos, en el cuerpo esférico en movimiento, lo que implicaba *ipso facto* para ese cuerpo una consistencia apropiada a su doble función: continente solidario de su contenido y vector indeformable de las revoluciones que realizaba alrededor de la Tierra.

Por tanto, al imponer a la materia de las esferas celestes la indeformabilidad abstracta de la figura geométrica, Aristóteles excluía la fluidez de los conceptos compatibles con ciertos fenómenos aparentes que salvar. Así lo entendió Muñoz cuando describía las esferas "sólidas como el vidrio", es decir, rígidas, indeformables y transparentes.

Conocía bien *De revolutionibus* de Copérnico. A él se refiere en numerosas ocasiones a propósito de diferentes técnicas de cálculo, tablas u observaciones particulares. También describe en sus rasgos generales el sistema heliocéntrico, acompañando la descripción de un diagrama similar al que figura en el capítulo X del libro I del *De revolutionibus*. Ese fue el comportamiento de la mayoría de los astrónomos de la segunda mitad del siglo XVI. Muy pocos aceptaron y defendieron el heliocentrismo, pero no dudaron en aprovechar técnicas y modelos copernicanos, readaptándolos a un esquema geostático.

Muñoz examina la doctrina central convencido de su falsedad. Aboga por una Tierra en reposo, en el centro del cosmos y ceñida por un inmenso océano de aire, cuya vida depende de las influencias que recibe del Sol, las estrellas y los planetas que la rodean. Pero los argumentos que esgrime contra el heliocentrismo no son bíblicos, sino de corte astronómico o cosmológico. En ese comportamiento le siguen Gabriel Serrano y Antonio Núñez Zamora, que le sucedieron en la cátedra de Salamanca, o Diego Pérez de Mesa, profesor en Alcalá y Sevilla. Ningún autor español de este siglo, según nuestros conocimientos, salvo el teólogo y filósofo Diego de Zúñiga, que al final de su vida cambió de parecer, defendió la teoría heliocéntrica como expresión de la verdad del cosmos.

Con sus observaciones, enseñanzas y obras Muñoz intervino en los debates astronómico-cosmológicos, en la reestructuración del saber y en la crisis de la cosmología tradicional. Merced a ello, allanó el camino que condujo a la nueva astronomía y la nueva física de Kepler y Galileo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LE MONDE DES SPHÈRES. Michel-Pierre Lerner, 2 vols. Les Belles Lettres, París, 1996-1997.

CÁLCULOS CRONOLÓGICOS, NOVEDADES COSMOLÓGICAS Y EXPECTATIVAS ESCATOLÓGICAS EN LA EUROPA DEL SIGLO XVI. Miguel Angel Granada, en *Rinascimento*, n.º 37, págs. 357-435, 1997.

MATEMÁTICAS, COSMOLOGÍA Y HUMANISMO EN LA ESPAÑA DEL SIGLO XVI. LOS "COMENTARIOS AL SEGUNDO LIBRO DE LA HISTORIA NATURAL DE PLINIO DE JERÓNIMO MUÑOZ". Víctor Navarro Brotóns y Enrique Rodríguez Galdeano, Instituto de Estudios Documentales e Históricos sobre la Ciencia, Universidad de Valencia-CSIC, 1998.

THE UNMAKING OF THE MEDIEVAL COSMOS, 1500-1760. FROM SOLID HEAVENS TO BOUNDLESS AETHER. William G. L. Randles, Ashgate, Aldershot, 1999.

Shawn Carlson

La visita de los rayos gamma

Algunas cosas sólo suceden por golpes de fortuna. El 23 de enero de 1999 un instrumento instalado en el satélite denominado *Experimento para la Detección de Fuentes Esporádicas y Explosiones* (BATSE por sus siglas en inglés) detectó un intenso fogonazo de rayos gamma procedente de la constelación del Boyero. Los astrónomos llevaban años avistando tales destellos de rayos gamma varias veces por semana en todas las zonas del firmamento. Pero, a causa de su muy fugaz naturaleza, se sabía muy poco sobre las fuentes de tan increíble energía. (¿Cómo se forman? ¿Dónde se originan?) Raramente brillan más de algunos minutos y las hay que apenas duran una minúscula fracción de segundo; dejan, pues, escaso margen para apuntar el instrumento adecuado. Y así, el episodio de la noche de marras, aunque intenso y de casi dos minutos de duración, al BATSE sólo le dio tiempo de determinar la fuente sobre un disco cuatro veces el diámetro lunar.

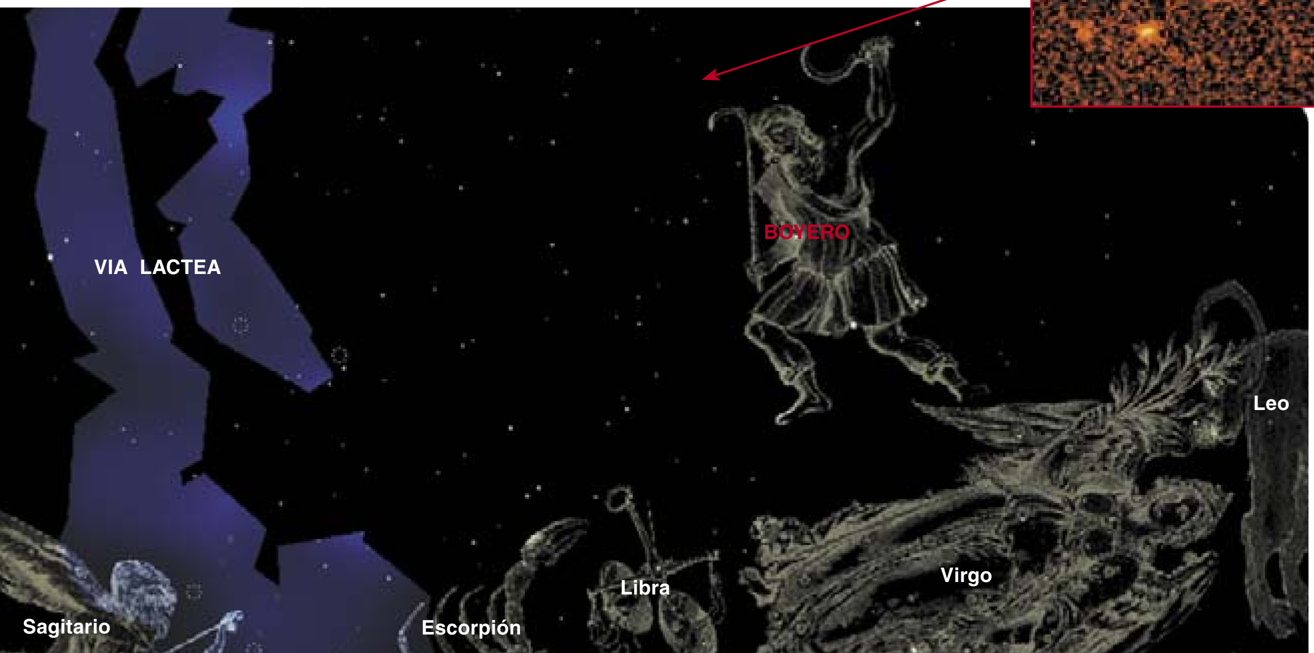
Pero intervino la suerte. Coincidió que, en el momento de extinguirse el destello, otro satélite, de nombre Beppo-SAX, se hallaba tomando vistas de la misma zona del firmamento mediante una cámara de campo ancho para rayos X (radiación de una frecuencia algo menor que la gamma). Seis horas después de recibir del BATSE, vía correo electrónico, la alerta de detección, los astrónomos habían fijado la posición exacta de una intensa fuente de rayos X que se encontraba en el interior de la región identificada por el BATSE, pero que antes no había estado allí.

Pudieron también obtener imágenes ópticas del destello gamma. A los 20 segundos de darse la primera alerta, un telescopio óptico robótico instalado en Los Alamos (Nuevo México) había ya apuntado cuatro cámaras de campo ancho. Identificada por otros la posición exacta del destello, el grupo de Los Alamos descubrió que sus primeras imágenes habían captado en la misma ubicación una estrella brillante (de magnitud 9) cuya luz se apagó de inmediato.

La noche siguiente el Keck II, potente telescopio de 10 metros instalado en Mauna Kea, entró en acción. Con su enorme superficie recolectora de luz, midió el corrimiento hacia el rojo del objeto y determinó que el destello de rayos gamma se había originado en el centro del universo visible.

Fue entonces cuando se descorchó el champán. Para que algo tan lejano brille con tal intensidad, la fuente debe de ser de una luminosidad increíble. Lo que produjo aquella radiación gamma fue, al menos por un rato, el objeto más luminoso hasta ahora identificado. Sin duda, los astrónomos habían hecho un descubrimiento de primera importancia. Pretenden ahora que nuestros aficionados se sumen al juego.

¿Y por qué? Pues porque los integrantes del equipo del BATSE saben que si aquella noche el satélite Beppo-SAX hubiese estado apuntando a otro



1. El cielo está poblado de sucesos misteriosos. Sin ir más lejos, este destello de rayos gamma (recuadro) *detectado el 23 de enero de 1999. Una red de aficionados podría colaborar en el desciframiento de la naturaleza de esos estallidos de energía, increíblemente intensos y exasperantemente breves*

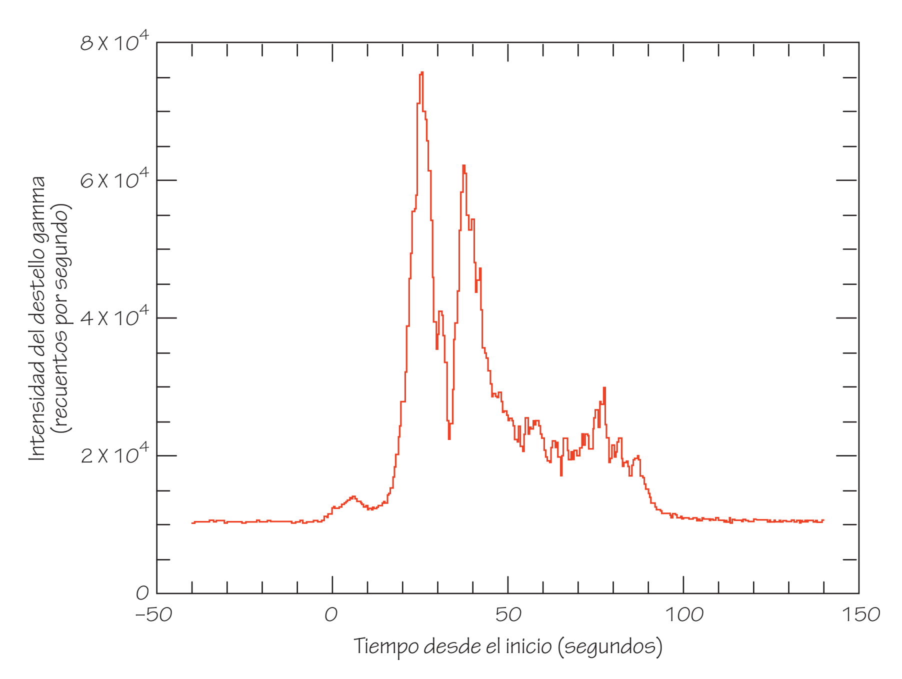
sitio, los astrónomos nunca habrían orientado los telescopios instalados en tierra para medir la distancia y la magnitud del objeto. Y aun así, costó unas horas preciosas fijar la posición de aquel objeto tan velozmente cambiante.

Un sistema mejor se compondría de numerosos observadores que centrarían su atención en la zona identificada por el BATSE en cuestión de minutos desde la detección del episodio. Con aficionados atentos, alguno acabará por localizar el objeto e informar para que entren en acción los profesionales con sus medios. El equipo del BATSE ha creado una red internacional de unos y otros que estarán listos para intervenir en cuanto el satélite detecte un destello de rayos gamma.

El reclutamiento de aficionados tiene una poderosa razón de ser. Miles de ellos poseen telescopios de calidad profesional. Pero podrían participar incluso con instrumentos modestos, los de espejo de 25 centímetros. Muchos aficionados poseen telescopios equipados con cámaras de dispositivo de acoplamiento por carga (CCD), de gran sensibilidad, capaces de captar la imagen electrónica de un campo estelar. Un ordenador personal podría luego procesar esa información en tiempo real para identificar nuevos objetos. Algunos telescopios más refinados son automáticos: reciben instrucciones por Internet y toman imágenes de cualquier punto del firmamento, sin que ni siquiera haya de estar presente un observador. La comunidad amateur puede constituirse en socio vital para el conocimiento de las fuentes de rayos gamma.

La red se está desarrollando bajo la supervisión de la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables (AAVSO), con sede en Cambridge (Massachusetts). La AAVSO organiza y compila información acerca de miles de estrellas variables. Hasta la fecha, tiene registradas más de nueve millones de mediciones de brillo estelar. Janet Mattei es la directora ejecutiva. El equipo observador está encabezado por Gerald J. Fishman, investigador principal del proyecto BATSE, y Mario Motta, cardiólogo y astrónomo aficionado de Lynnfield.

Quien desee unirse al equipo deberá entrar en el sitio Web de la AAVSO (www.aavso.org) y rellenar la solicitud en línea, que incluye datos acerca del tamaño de su telescopio, campo de visión y emplazamiento.



2. Una efímera intensidad caracteriza a los destellos de radiación gamma, lo que constituye un grave obstáculo para su localización precisa. El evento detectado el 23 de enero de 1999 duró menos de dos minutos

Antes de embarcarse en una larga noche de aventuras astronómicas, hay que notificarlo a la AAVSO por correo electrónico a aavso@aavso.org. Entonces, siempre que el BATSE detecte una explosión de rayos gamma y consiga los datos acerca de la zona objeto respecto a su centro y anchura, un ordenador de la AAVSO remitirá automáticamente esa información por correo electrónico a todas las personas que se hayan registrado para esa noche.

Desde luego, la determinación por el BATSE de la ubicación de un episodio adolecerá siempre de una gran incertidumbre. Pero aunque no haya más de 10 observadores en línea y éstos escudriñen la zona identificada con aparatos CCD de formación de imágenes en campo ancho, parece probable que muchas de las radiaciones visibles que acompañan a todo destello de rayos gamma sean captadas en cuestión de minutos tras recibirse la alerta. Los participantes podrán entonces enviar electrónicamente sus resultados a la AAVSO. Todos los que se hallen en la red podrán seguir la información en tiempo real.

Evidentemente, hay métodos mejores. Lo ideal sería emplear la información de la base de datos de la AAVSO para asignar un lugar concreto de la zona identificada a cada observador situado en línea, maximizando así el cubrimiento de la región del cielo asiento del destello e incrementando, con ello, la probabilidad de que alguien dé con él. Además, el modo más sencillo de localizar las radiaciones visibles de una explosión de rayos gamma en una imagen CCD es ejecutar un programa que identifique todas las estrellas de esa imagen y las compare luego con las estrellas contenidas en un catálogo electrónico, del tipo que compiló la NASA para proporcionar estrellas guía al Telescopio Espacial Hubble.

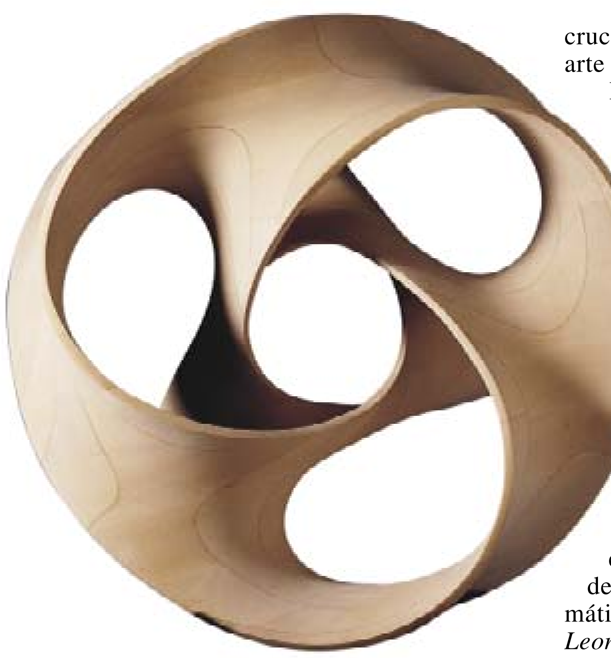
Para redactar un programa de ordenador capaz de todo eso haría falta un programador de primera fila. Por desgracia, al ser la AAVSO una organización no lucrativa, carece de presupuesto para contratar a una persona de tales características. Por ello, quien sea experto en informática y desee ofrecer sus talentos a un avance de la ciencia de vanguardia, puede contactar con Janet Mattei. Se trata de efectuar una contribución duradera al desvelamiento de uno de los mayores misterios de la astronomía.

Para más información sobre este y otros proyectos, visítese la página Web de la Society for Amateur Scientists en earth.thesphere.com/sas/WebX.cgi. Puede también escribirse a la Sociedad a 4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA 92117.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Esculturas: reales y virtuales



Aunque los matemáticos estén convencidos de la hermosura de su disciplina, son muchos los que no ven esa elegancia por ningún lado. Ni recuerdan embelesados su batalla personal con la aritmética en primaria o contra el álgebra en el bachillerato. Pese a ello, admítaseme, las matemáticas poseen belleza a muchos niveles. Tal vez resulte difícil apreciar la elegancia lógica de ciertas demostraciones matemáticas bien construidas. La belleza de las formas geométricas, en cambio, se halla muy próxima a la estética de las artes plásticas —de la escultura, en especial— y resulta más accesible para todos.

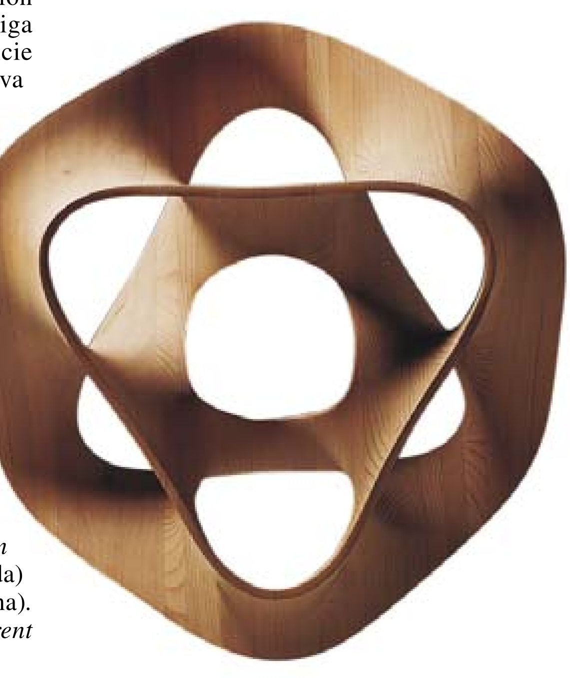
Me he ocupado ya de esculturas de inspiración matemática ("Las esculturas de Alan St. George", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1996). La correspondencia que suscitó aquel artículo reveló la existencia de una apabullante diversidad de arte matemático. Trataré en éste de las relaciones entre la matemática de las superficies minimales y las exquisitas esculturas de madera laminada que ha creado Brent Collins, de Gower. Como se verá, hay también preguntas cruciales sobre la relación entre el arte virtual y el real.

En los años ochenta, Collins estaba confeccionando maravillosas esculturas abstractas sin intención consciente de conferirles significación matemática. Con el tiempo, sin embargo, se percató de que tendía a minimizar el área de las superficies tendidas entre los bordes de sus esculturas. Estaba, en efecto, reproduciendo ciertas formas topológicas básicas. En 1995, Collins sumó sus fuerzas a las de Carlo H. Séquin, informático de la Universidad de California en Berkeley, con el propósito de explorar las conexiones matemáticas de sus obras de arte (véase *Leonardo*, 30, 1997, 85-96).

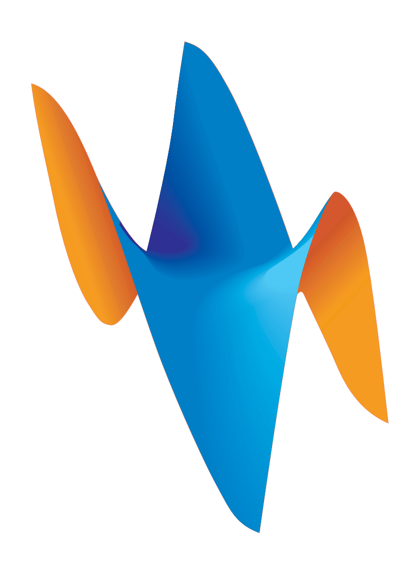
En nuestro caso, la figura clave es una superficie alabeada lisa, llamada silla o galápago, que se asemeja a la silla utilizada para montar a caballo. Los galápagos son las componentes básicas de las superficies minimales. Los matemáticos entienden por superficies minimales las que tienen área mínima y cumplen cierta condición que impide que el área se contraiga a cero (por ejemplo, la superficie ha de extenderse sobre una curva dada).

Para disponer de una analogía física, retorzamos un alambre, dándole forma de curva cerrada, hundámoslo en agua jabonosa y observemos la forma de la película de jabón engendrada. Aun cuando el alambre tenga complicados bucles y nudos en el espacio, la película de jabón ofrece siempre un aspecto elegante, bien proporcionado. Y todos sus puntos son puntos de ensilladura. Esta propiedad, consecuencia de la minimización de área, obliga a la superficie a tener curvatura nula. Eso no significa que la superficie sea plana; indica que en las inmediaciones de cada punto la superficie se parece a una silla de montar, curvándose hacia arriba en una dirección y hacia abajo en otra.

Collins empezó con superficies desarrolladas a partir de galápagos, pero rápidamente progresó hacia formas más complejas que utilizaban las "ensilladuras de monos." Como el propio nombre sugiere, esta superficie evoca la imagen de una imaginaria silla sobre la que pudiera cabalgar un mono: la silla se curva hacia abajo en tres direcciones, dos para las patas del mono, más una tercera para su cola. Intercaladas entre aquéllas hállanse tres direcciones de curvatura hacia arriba. Un bucle cerrado que contornease el borde de tal silla se curvaría tres veces arriba y otras tantas hacia abajo, formando seis "ondas". Un bucle similar que contornease el borde de un galápago ordinario formaría sólo cuatro ondas.



1. Las superficies minimales quedan plasmadas con gran belleza en Trifolio hiperbólico (arriba, izquierda) *y en* Hexágono hiperbólico (derecha). *Ambos, creación del escultor Brent Collins*



2. La silla del mono es una superficie minimal que posee tres direcciones de curvatura hacia abajo

Existen también sillas de montar para "cuadrúpedos" y otras de órdenes aún más altos.

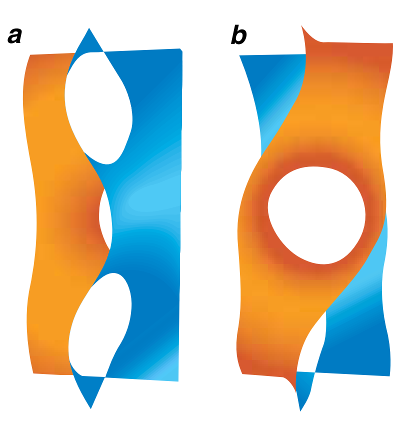
Para ver cómo incorporó Collins estas figuras a sus obras de arte, examinemos su *Hexágono hiperbólico*, concluido en 1995. Consta de seis galápagos normales vinculados en una formación anular. Esta obra guarda estrecha relación con la torre de Scherk, superficie minimal que consiste en una serie de galápagos concatenados que crean perforaciones orientadas en direcciones alternas. Tomando una torre de Scherk de seis pisos y curvándola para darle forma de círculo, de modo que las partes alta y baja de la torre se unan entre sí, se obtiene un anillo tórico cuya forma general es la del *Hexágono hiperbólico*.

La colaboración entre Collins y Séquin les llevó a idear una estructura totalmente diferente, en la que se imprime a la torre de Scherk una torsión de 90 grados antes de unir sus bordes, algo semejante a la construcción de una banda de Möbius, en la que una cinta de papel es retorcida 180 grados antes de conectar sus extremos. La torsión provoca que las dos caras de la cinta se fundan una en otra; si empezásemos a pintar de rojo "una" de las caras y prosiguiéramos sin cesar, al final nos veríamos obligados a pintar de rojo también el "otro" lado. Es decir, la superficie de Möbius tiene un solo lado. Una torre de Scherk no torsionada viene a ser como una cinta de papel ordinaria: tiene dos lados distintos, que podemos pintar de distinto color. Otro tanto vale para el *Hexágono hiperbólico*. Ahora bien, una superficie análoga construida a partir de una torre de Scherk torsionada sería como una cinta de Möbius y tendría una sola cara.

Los bordes situados en lo alto y lo bajo de una torre de Scherk forman cruces, a modo de signos más; encajan perfectamente si el ángulo de torsión es múltiplo de 90 grados. La torsión también ha de tener en cuenta los orificios de la torre, sin embargo. Dado que los orificios de la torre de Scherk van en direcciones alternas, las torsiones correspondientes a múltiplos impares de 90 grados funcionan sólo para torres con número impar de pisos, y las correspondientes a múltiplos pares de 90 grados, sólo con número par de pisos. La escultura *Trifolio hiperbólico* de Collins es un anillo toroidal que se obtiene impartiendo a una torre de Scherk de tres pisos una torsión de 270 grados, y uniendo después sus extremos.

Séquin ha dado a estas superficies el nombre de "superficies Scherk-Collins". La plasmación matemática de las ideas de Collins ha hecho posible idear nuevas variaciones de forma sistemática. El método matemático ha simplificado también la manufactura de tales obras de arte. Las esculturas de Collins están construidas en madera laminada, mediante un proceso lento y delicado; por ello, antes de emprender una versión definitiva, Collins prepara prototipos con tubo de PVC y láminas de cera. Consigue un modelo preciso de la superficie, pero ello le requiere varios días. Para acelerar el proceso, Séquin —con ayuda de su alumno Houman Meshkin— ha preparado un programa de grafismo informático que permite representar las superficies Scherk-Collins sobre la pantalla de un ordenador.

El programa ofrece la posibilidad de elegir ciertos parámetros geométricos, lo que concede al artista libertad para estirar o deformar la superficie según convenga y así obtener un efecto estético grato. Los parámetros más evidentes son el número de pisos de la torre y la magnitud de la torsión, aunque hay otros que controlan, por ejemplo, el tamaño de los agujeros. También la torre es susceptible de generalización y se admite la introducción de variantes; por ejemplo, torres que conecten ensilladuras de mono en vez de galápagos normales. Moldeada la superficie en la pantalla, con herramientas de construcción de



3. Las torres de Scherk están formadas por galápagos concatenados que delimitan una serie de orificios. Una torre de tres pisos (a) *puede sufrir una torsión de 90 grados* (b). *Al unir entonces sus extremos quedará una superficie de una sola cara*

prototipos podemos transformar la escultura virtual en objeto real. Séquin ha creado docenas de modelos de superficies Scherk-Collins por este método.

Existe, sin embargo, una alternativa más controvertida. El grafismo informático ha adquirido tal potencia, que las esculturas virtuales ofrecen casi el mismo aspecto que los objetos reales. Los programas de grafismo permiten, por ejemplo, conferir a la imagen prácticamente cualquier textura superficial que se desee, pudiendo darle aspecto de madera veteada, de cobre brillante, de piel de serpiente o de tejido. Las imágenes impresas de la estructura virtual resultarían difíciles de distinguir de fotografías de una escultura real y material. Y un amante del arte, equipado con unos cascos de realidad virtual, podría "pasear en torno" a la escultura virtual y obtener una vívida impresión de tridimensionalidad.

En vista de todo esto, ¿será necesario *construir* la escultura? ¿No bastaría dejarla en estado virtual? A la mayoría de los artistas tal propuesta les parecería inaceptable, pero la opinión de futuras generaciones —familiarizadas con sistemas de realidad virtual— podría muy bien ser otra. Collins se manifiesta inequívocamente: "En cuanto especie que ha evolucionado para construir y utilizar herramientas, los humanos sienten la belleza de los objetos de arte hechos a mano. Siempre tendremos necesidad de ellos, pues revelan nuestra naturaleza." Con otras palabras: no se puede superar lo auténtico.

NEXOS

James Burke

Los agitadores que mueven los hilos

Dicen de los perros rabiosos que buscan el sol de mediodía. También lo dicen de los ingleses. Haciendo honor a ese distintivo nacionalista, así estaba yo hace poco, filmando una refinería del Oriente Medio y ponderando por qué el fisiólogo John Scott Haldane, experto en efectos de tensión extrema, se fue a Persia en 1936 para investigar los ataque al corazón que sufrían los trabajadores de los yacimientos petrolíferos. Al volver a los duros rigores de Oxford cogió una neumonía que le llevó a la tumba. Lo que no dejaba de tener su punto de ironía del destino en él, que había destacado por sus trabajos innovadores en materia de respiración. En particular, continuando el estudio experimental del fisiólogo francés y experto en mimosas Paul Bert, quien identificó, en 1878, lo que conocemos como la enfermedad del buzo. Los hombres rana sufren la narcosis por nitrógeno si salen a la superficie demasiado rápido y se forman en su cuerpo burbujas de este gas, que causan diversos síntomas, desde hemorragia nasal y dolor en las articulaciones hasta parálisis fatal.

Los óptimos resultados de Bert llegaron demasiado tarde para salvar a los buzos que trabajaban en el nuevo puente sobre el Mississippi en Saint Louis. En aquel tiempo, era el mayor del mundo (y creo que el primero en emplear secciones en voladizo para cerrar el arco). El problema, ay, para los que se sumergían para hincar las pilastras (cavando 30 metros bajo el lecho dentro de una campana de aire comprimido) era que contraían la enfermedad de la campana (alias enfermedad del buzo). Tras la muerte de dos trabajadores en marzo de 1870, el ingeniero del puente ordenó que el regreso a la superficie se efectuara lentamente para facilitar una descompresión más gradual. Un tal James B. Eads.

La "B" era la inicial de Buchanan, el nombre del primo de la madre de Eads, que fue el último presidente de los Estados Unidos antes del estallido de la Guerra Civil. James Buchanan tenía otras tres reivindicaciones principales para pretender la fama. Destituyó a Brigham Young para asegurarse de que Utah seguiría dentro de la Unión; envió el primer mensaje transatlántico submarino; y en 1856 ganó la presidencia al batir a Millard Fillmore. Llevaba éste ya tres años ocupando la máxima magistratura, mandato durante el cual envió al comodoro Matthew Perry con una flota estadounidense a Japón, donde Perry firmó un tratado que abría el país asiático al comercio occidental. El navío de Perry, *Fulton*, recibió su nombre de otro héroe de la navegación, Robert Fulton, quien construyó el primer barco a vapor que funcionó. El año 1804 un primer ensayo de Fulton (en el Sena, en París) se saldó con la vertiginosa velocidad de 2,9 millas por hora. De vuelta a América, Fulton y su nuevo socio, Robert R. Livingston (antiguo embajador americano en Francia), lo intentaron de nuevo. Alcanzaron un récord de 4,7 millas por hora, velocidad que permitía competir con la vela.

Livingston era ya una figura conocida de la política estadounidense, pues había participado en el comité que esbozó la Declaración de Independencia, tomó juramento a George Washington y, por último, pero no por ello lo menos importante, concertó la Compra de Louisiana (de los Estados Unidos a Francia). Cuando en 1803 vendió Louisiana, Napoleón debió de quedar satisfecho de haberse sacado de encima aquel territorio a cambio de 27 millones de dólares y algo de calderilla, porque *a*) necesitaba desesperadamente liquidez y *b*), gracias a un egregio estafador escocés, la remota Louisiana había dejado a Francia en la bancarrota, por un chanchullo en el que se habían colado bonos basura haciéndolos pasar por inversiones seguras. Considerando el proceso criminal que siguió al hundimiento de la empresa, el escocés que había pergeñado la idea tenía el nombre más inoportuno de la historia: John Law. Su partida de antecedentes penales hubiera servido de guión a una película trepidante. Acusado de asesinato en Londres, escapa de la cárcel limando los barrotes y drogando a los guardianes. Huye al continente y se gana una reputación (entre 1694 y 1704 se lucró una fortuna en el juego). Regresa a Escocia con un artero plan para introducir el papel moneda. Rechazado por los ladinos escoceses, vuelve a las mesas de juego y se hace tan rico, que convence a los galos del plan de los billetes.

Law no encontró tampoco oposición cuando sugirió su plato fuerte: un gigantesco fondo de inversión para aspirantes a millonarios que compraran participaciones en la Louisiana francesa. El charlatán describía encomiásticamente un territorio henchido de oro y piedras preciosas (no había tales), nativos trabajadores (no había tales) y una magnífica capital (no había tal). El dinero llegaba a chorros y el precio de las participaciones en Louisiana subió por las nubes.

Law no tuvo recato en autoproclamarse duque de Arkansas. Comenzó a construir su otrora inexistente capital de Nueva Orleans. Tarde o temprano alguien echó un vistazo más de cerca y descubrió lo que realmente era

Louisiana: polvo, árboles y agua. El ardid entero se fue por la alcantarilla. Al igual que la economía francesa del papel moneda. Y el gobierno. ¿Y Law? Hacía tiempo que se había marchado (¿adónde si no?) al paraíso de los jugadores, a Venecia.

En una etapa anterior de esta accidentada trayectoria, Law se había hecho amigote en Londres de Thomas Neale, un promotor inmobiliario, maestre de la Casa de la Moneda inglesa y funcionario encargado de extender las licencias a las casas de juego. En 1694 Neale persuadió al gobierno de que él debería administrar varias loterías; uno de los agraciados en la pedrea fue un cochero que trabajaba para John Evelyn, famoso por sus notas. El diario de Evelyn, de fácil lectura, aporta las percepciones de un íntimo conocedor de la época, pues el autor había estado bien situado para apuntar qué le estaba haciendo cada uno a quién; a todos conocía. Incluida una ecléctica concurrencia de personajes peculiares que se reunían regularmente en el Colegio Wadham de Oxford para hablar con suficiencia de sabios; Evelyn les sugirió que formaran una tertulia experimental físico-matemática. Cosa que hicieron. Llegó a conocerse como la Regia Sociedad.

Aparte de estos escarceos científicos, Evelyn también escribió una obra sobre arboricultura que le dio autoridad, pontificaba sobre la arquitectura, coleccionó libros y antigüedades, viajó sin cansancio y cuidaba su jardín. La única mácula en su historial fue haber alquilado su casa londinense a cierto almirante Benbow, que la subarrendó a su vez a un sargento/carpintero ruso de visita llamado Piotr Mijáilov, quien decía trabajar en los cercanos astilleros de Deptford. A este fulano lo que le divertía era subirse en una carretilla y que le llevaran a todo correr por el jardín de Evelyn, aunque con el entretenimiento no quedara parterre sin destrozar. Evelyn no dijo nada, porque el sargento resultó ser Pedro el Grande, que visitaba Inglaterra de incógnito para conocer el progreso inglés y modernizar a Rusia cuando volviera. A fe que lo hizo. Mientras tanto, durante las vacaciones pagadas en el extranjero, dejó los asuntos internos en manos de su chambelán, el príncipe Boris Golitsyn.

Como el príncipe había ya trabajado entre bastidores para procurarle a Pedro el trono, se puede decir que era un agitador de los que mueven los hilos. Un rasgo de familia, puesto que su descendiente (que se llamaba igual) acabaría presidiendo la Asociación Sísmica Internacional en su reunión de 1911 en Moscú. Boris había sido elegido por su reputación en la agitación terráquea: había puesto a Rusia a la vanguardia de la sismología con un cachivache eléctrico para registrar temblores. Cuando un temblor provocaba que un pequeño péndulo con bobinas oscilara en el seno de un campo magnético, el movimiento inducía en las bobinas una corriente. Mida usted la corriente, y medido está el temblor. El sismógrafo de Golitsyn fue el prototipo de los instrumentos que acabarían por emplearse para localizar los campos petrolíferos de Persia, cuyos trabajadores iban a sufrir golpes de calor por culpa de las horas que pasaban al sol de mediodía.

Libros

Lógica

y metodología

Logic, por Paul Tomassi. Routledge; Londres, 1999. **Einführung in die moderne Logik**, por Franz von Kutschera y Alfred Breitkopf. Verlag Karl Alber; Freiburg, 2000. **Sets, Logic and Categories**, por Peter J. Cameron. Springer; Londres, 1999.

Aristóteles: Categorías, De interpretatione. Porfirio: Isagoge. Introducción, traducción y notas de Alfonso García Suárez, Luis M. Valdés Villanueva y Julián Velarde Lombraña. Tecnos; Madrid, 1999. **Zeichen und Wissen. Das Verhältnis der Zeichentheorie zur Theorie des Wissens und der Wissenschaften im dreizehnten Jahrhundert**, por Michael Fuchs. Aschendorff Verlag; Münster, 1999. **Johannes Venator Anglicus. Logica**. Edición crítica de L. M. de Rijk. Friedrich Frommann Verlag; Stuttgart, 1999.

G. Frege. Idéographie. Traducción al francés, prefacio notas e índice de Corine Besson; postfacio de Jonathan Barnes. Vrin; París, 1999. **For and against Method**, por Imre Lakatos y Paul Feyerabend. Edición e introducción de Matteo Motterlini. The University of Chicago Press; 1999.

La lógica es la ciencia del razonamiento correcto, al que confiere claridad y rigor, trátese de una deducción física, sociológica, filosófica o de cualquier otro ámbito. Al lógico compete distinguir el argumento correcto del sofista o incorrecto. Un argumento no es más que un enunciado o conjunto restringido de enunciados (premisas) que nos llevan a otro (conclusión). En toda argumentación válida, siempre que las premisas sean verdaderas lo será la conclusión.

Porque la validez de la argumentación depende de su propia estructura, la lógica se considera propedéutica a toda ciencia. Del estudio de la inferencia válida en lenguajes artificiales se ocupa la lógica simbólica, cuyos enunciados o fórmulas se pretende que sean un espejo de las formas del lenguaje natural. Un sistema formal abarca un alfabeto de símbolos, un conjunto de fórmulas, un conjunto de axiomas y un conjunto de reglas de inferencia. En dicho sistema, por prueba se entiende una secuencia de fórmulas tal, que cada fórmula de la secuencia o es un axioma o se obtiene de fórmulas precedentes en la secuencia mediante aplicación de una regla de inferencia. Por teorema del sistema formal se entiende la última línea o fórmula de prueba. Establecido un sistema formal, podemos tratarlo como objeto matemático por propio derecho.

Los cursos de lógica formal comienzan con el cálculo proposicional (cálculo sentencial), en el que se construye una teoría de inferencia válida para un lenguaje formal constituido por el conjunto de variables proposicionales y los conectores. Cinco son los conectores lógicos o functores veritativos: y, o, si... entonces, si y sólo si, no. Propio del cálculo proposicional será ocuparse de la negación, la conjunción, la disyunción, etcétera. En su operación el cálculo proposicional dispone de una docena de reglas de inferencia. Se llaman teoremas de la lógica proposicional aquellos enunciados cuyo conjunto de premisas sea el conjunto vacío. Los teoremas son verdades lógicas.

A esos primeros capítulos seguirán los que expliquen el cálculo de predicados (lógica de primer orden, teoría elemental de la cuantificación). Los lenguajes de primer orden se construyen mediante conectores, cuantificadores de primer orden universales o existenciales, variables y predicados. Las estructuras a las que se aplica la lógica de primer orden son conjuntos sobre los que se definen relaciones y funciones (grupos, conjuntos ordenados, etc.). Es, por tanto, un sistema idóneo para abordar los fundamentos de la matemática.

Aunque el desarrollo expositivo de la lógica de primer orden corre paralelo al de la lógica proposicional, difiere aquélla de ésta en dos aspectos importantes; primero, las proposiciones básicas dejan de ser indivisibles y crean enunciados sobre una estructura matemática equipada con relaciones, funciones y constantes; segundo, el lenguaje incluye la cuantificación, y así podemos decir que todos los elementos de la estructura satisfacen una ecuación o propiedad dada, o que tal elemento lo hace.

La lógica de primer orden nos indica, en su designación, que existen lógicas de orden superior, donde se permite cuantificar todos los subconjuntos del dominio o todas las relaciones del dominio, y no sólo los elementos del dominio. Por fin, en las lógicas infinitarias se admite que las fórmulas involucren disyunciones o cuantificaciones infinitas.

En razón de su interés básico, la lógica es materia obligada en distintas facultades, lo que explica la cascada de textos que aparecen sin cesar y aquí compendiamos en tres recentísimos: *Logic*, de Paul Tomassi, *Einführung in die moderne Logik*, de Franz von Kutschera y Alfred Breitkopf, y *Sets, Logic and Categories*, de Peter J. Cameron. Cada uno posee rasgos distintivos, complementarios.

Ninguno más recomendable para iniciarse que el manual de Tomassi. Lejos de desanimar al lector de nula preparación matemática, parte siempre del lenguaje ordinario para asentar los fundamentos de la lógica formal. En todos y cada uno de los casos, los métodos se explican con claridad y se ilustran antes de pasar a su formalización. Vuelve al mismo ejemplo cuantas veces cree necesario y resume en recuadros la explicación minuciosa que ha ido desgranando. Se trate de la teoría de la validez o de la teoría de la prueba. Lo mismo en la sintaxis que en la semántica.

La sintaxis se ocupa de explicar qué cadenas de símbolos constituyen fórmulas de un sistema particular y qué cadenas o secuencias de símbolos son “teoremas”. No se atribuye ningún significado a los símbolos: las reglas para demostrar si una secuencia es una fórmula bien formada, y las reglas para manipular fórmulas y demostrar “teoremas”, son puramente formales. La semántica sí se preocupa de conceder un significado a las fórmulas, de suerte que cualquier fórmula exprese un hecho (que podría ser verdadero o falso, o unas veces verdadero y otras falso

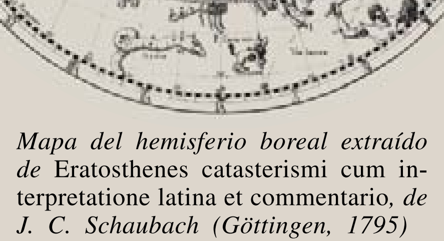
Astronomía clásica

The History and Practice of Ancient Astronomies, por James Evans. Oxford University Press; Nueva York, Oxford, 1998.

James Evans es profesor de física en la Universidad norteamericana de Paget Sound, donde enseña también historia de la ciencia. Su cuidadoso sentido didáctico se expresa en este libro por su claridad, su afán explicativo y su útil tendencia a citar y emplear ejemplos y ejercicios prácticos. De este modo, y aunque su obra cuente con casi 500 páginas de gran formato, el libro no se cae de las manos y resulta en muchos casos francamente instructivo.

El título ya lo dice todo: *Historia y práctica de las antiguas astronomías*. Más práctica que historia, y en esta preferencia radica su mayor originalidad. Contamos con historias de la astronomía mucho más completas y detalladas. Pero ninguna como ésta nos enseña a calcular con numerales babilonios, a predecir eclipses como lo hacía Aristarco, prever el valor de la próxima retrogadación de Marte utilizando los métodos de que se valía Ptolomeo o a usar el astrolabio tal como lo hacían los árabes. Se dan además detalladas instrucciones sobre cómo construir y manejar instrumentos antiguos, o valerse de los relojes de sol con los criterios fijados por Vitrubio. Una serie de ejercicios prácticos al final de cada capítulo nos permiten entretenernos repitiendo las vivencias y experiencias de los viejos astrónomos.

El profesor Evans nos permite introducirnos en los problemas y las dificultades de los sabios de otros tiempos y nos proporciona un utillaje matemático que para los babilonios, los egipcios, los griegos o los árabes resultaría ininteligible. Quizá ninguno de los libros sobre las antiguas astronomías contiene tantas fórmulas rigurosamente expresadas en términos actuales. Es esta conjunción de concepciones antiguas y formulaciones modernas uno de los méritos de este libro, que en ningún caso se queda, a la hora de explicar los secretos de la cinemática celeste, en las simples suposiciones de otros tiempos.



Mapa del hemisferio boreal extraído de Eratosthenes catasterismi cum interpretatione latina et commentario, *de J. C. Schaubach (Göttingen, 1795)*

Más de un lector podría encontrar una contradicción entre lo prometido y lo expuesto. El libro no se refiere a todas las astronomías antiguas, sino fundamentalmente a la griega y accidentalmente a la babilonia, la egipcia, la árabe, la medieval y renacentista. La preferencia por lo helénico lleva a curiosas y hasta desconcertantes contradicciones: así, al referirse al calendario, comienza con el griego (pág. 163), pasa luego a la reforma juliana (págs. 164-168), a la reforma gregoriana del siglo XVI (168-175), más tarde al antiquísimo calendario egipcio (175-182) y al fin al babilónico (187-190). Estos saltos hacia adelante y hacia atrás resultan extraños, y responden a la tesis del autor de que la astronomía griega es el resultado y la base de todas las demás: se centra en Grecia, y de ahí realiza excursiones en una u otra dirección para conocer los orígenes y las consecuencias. El título de "Teoría y práctica de la astronomía griega, y sus relaciones", hubiera sido tal vez más adecuado.

El libro queda enriquecido con útiles tablas, dibujos y plantillas, abundantes notas y una buena bibliografía.

José Luis Comellas García-Llera

según los valores de las variables que contiene), y cualquier teorema exprese un hecho sobre los sistemas a los que se aplica.

Más al uso, *Einführung in die moderne Logik* alcanza con ésta su séptima edición, lo que indica su amplia aceptación, sobre todo en las academias de filosofía y humanidades. Parte del objeto de la lógica, la doctrina del raciocinio, y su estatuto en el universo de la filosofía actual. Un estudio del raciocinio exige un análisis previo de la doctrina del juicio, juicios que se construyen sobre conceptos. Igual que el precedente, este manual progresa en los distintos niveles de lógica y aporta numerosos ejercicios con sus soluciones.

El enfoque matemático caracteriza al tratadito de Cameron S*ets, Logic and Categories*. Los tres apartados del título desempeñan una función dual en matemática. Por un lado, constituyen pilares sobre los que se erige cualquier constructo matemático; por otro, son ramas propias de la matemática, toda vez que empleamos técnicas de la misma para demostrar teoremas en teoría de conjuntos, lógica y teoría de la categoría.

Resumida la lógica proposicional en el capítulo tercero, y la lógica de primer orden en el cuarto, pergeña los grandes trazos de la teoría de modelos, que se ocupa de la relación entre las estructuras de la matemática y las fórmulas lógicas que aquéllas satisfacen. Recuerda Cameron que la lógica formal constituye un legado de las paradojas de la teoría de conjuntos. En su empeño por poner la matemática en el camino recto, Hilbert propuso que la consistencia de una disciplina matemática podría establecerse mediante la traducción de la disciplina en un lenguaje formal sujeta a manipulación mecánica. Y no podría demostrarse una contradicción en el sistema original. El programa de Hilbert se vino abajo con el teorema de Gödel.

El primer sistema de lógica digno de tal nombre, la *silogística*, lo creó Aristóteles. Un silogismo consta de dos premisas y una conclusión. Limitado en su alcance, el sistema de la silogística no considera la lógica de las relaciones. Pero su valor

indiscutido duró dos mil años, de lo que dan testimonio tres publicaciones recientes: *Aristóteles: Categorías, De interpretatione. Porfirio: Isagoge*, *Zeichen und Wissen. Das Verhältnis der Zeichentheorie zur Theorie des Wissens und der Wissenschaften im dreizehnten Jahrhundert* y *Johannes Venator Anglicus. Logica*.

En las *Categorías* Aristóteles estudia los términos, los componentes de los enunciados; en *De interpretatione* aborda los enunciados, los componentes de los silogismos, que constituyen, a su vez, el objeto de los *Analíticos*. Estos y otros tratados lógicos conforman el *Organon*.

Las categorías aristotélicas delimitan las diez divisiones necesarias entre conceptos. La tajante separación entre predicados generales: "De las cosas dichas sin combinación alguna, cada una de ellas significa o substancia, o cantidad, o calificación, o un relativo, o dónde, o cuándo, o estar en una posición, o tener, o hacer, o ser afectado." A la categoría de substancia pertenece el término hombre; a la de cualidad, su valor. En la Edad Media los términos descriptivos empleados se llamarán *categoremáticos*; *sincategoremáticas* serán las expresiones —"no", "todo", "alguno", "y"— que precisan el acompañamiento de los términos categóricos.

De interpretatione se divide en cinco partes: sonidos, afecciones del alma y cosas reales se exponen en la primera; en la segunda, el nombre; en la tercera, el verbo; la oración en la cuarta, y, en la quinta, la afirmación y negación. Pese a su brevedad, el tratado aristotélico sobre los enunciados ejerció una influencia determinante en el desarrollo ulterior de la lógica y la teoría del conocimiento.

La teoría de las categorías se convirtió en un tema central del pensamiento de Occidente a partir de la introducción, *Isagoge*, del neoplatónico Porfirio (233-310 d.C.). Se trata aquí en particular de los predicables. Según Aristóteles éstos eran la definición, propio, género y accidente; lista que Porfirio modificó añadiendo la especie y la diferencia, suprimiendo la definición. La *Isagoge* de Porfirio, planteaba el problema de los universales, vale decir, el significado de los nombres de géneros, de substancias.

Desde la antigüedad clásica, el término constituye el signo por antonomasia. El signo es representación de algo; el término, representación, oral o escrita, del concepto. En puridad, la lógica medieval, que definía el signo como *vox articulata ad significandum instituta*, no lo restringía a la representación de la cosa designada; podía llevarnos al conocimiento por medio de una *similitudo* o por otra conexión distinta. La naturaleza representativa del signo dependía de la correspondiente concepción de los universales.

Principio del "tercio excluso" y su tabla de verdad

$A \lor \neg A$

A	$\neg A$	$A \lor \neg A$
V	F	V
F	V	V

Ese es el terreno que transita Michael Fuchs en su estudio sobre semiótica medieval, *Zeichen und Wissen*, centrado en las figuras de san Buenaventura, Robert Kilwardby, Roger Bacon y santo Tomás. Buenaventura, portavoz de la tradición agustiniana (el mundo sensible representación del mundo trascendente), no escribió ningún tratado sobre los signos. La relación entre *res et signum* debe extraerse de su obra escrita, así como de la interpretación de los términos *vestigium*, *imago*, *liber*, *similitudo*, *nutus* (lazo). Para él, signo es lo que nos lleva al conocimiento de lo significado, como el efecto a la causa. Roger Bacon sí redactó un tratado sobre la cuestión, *De signis*, donde expone que los signos y las expresiones sincategoremáticas no pueden ser infinitas. El signo no sólo estimula a los sentidos, según opinión común entonces, sino también al entendimiento, tesis que basa en Aristóteles. Más aún, distingue entre signo natural y signo inducido por la inteligencia.

En sus comentarios sobre Pisciano, Kilwardby aborda la relación entre signo y saber. De san Agustín toma la idea de signo; de Aristóteles, la noción de ciencia. Con los ejemplos clásicos del humo que evoca el fuego, o el eclipse que indica la interposición de un cuerpo obscuro, insiste en la relación de signo entre el efecto y la causa. Pero la ciencia de los signos exige, sostiene, que podamos extraer del signo singular una razón universal abstracta. Para Tomás de Aquino signo era lo estipulado para indicar otra cosa, el medio que nos lleva al conocimiento de algo distinto de la propia señal. Le concede, además, una interpretación social: sólo entre los organismos tiene razón de ser la comunicación a través de signos. Las palabras, los términos, adquieren sentido en su referencia a las cosas y a los conceptos. Lo que es primero en el ser, la causa anterior al efecto, lo es también en la significación; por tanto el "verbo mental", es decir, el concepto, importa más que su signo o expresión oral.

Escribía Johannes Venator que ninguna proposición falsa se conoce como signo. De los términos, los juicios y los raciocinios se ocupa en su *Logica*, un extenso tratado que marcó el rumbo de los maestros de su tiempo, Pablo de Venecia incluido. Se imprime ahora por vez primera. Se cree que ese "Juan el cazador" fue el lógico inglés John Hunteman, docente en Oxford en las postrimerías del siglo XIV.

Los lógicos de ese período conservaron y ahondaron en el legado

Ingeniería genética

INGENIERÍA GENÉTICA Y TRANSFERENCIA GÉNICA, por Marta Izquierdo Rojo. Editorial Pirámide; Madrid, 1999.

Escribir sobre ingeniería genética no es fácil. Tiene el atractivo de tratarse de una técnica que permite la realización de una idea fascinante: la manipulación de la información genética, que presenta un innegable impacto social, ante el temor subyacente de que se introduzcan cambios en nuestros genes, es decir, en nuestra identidad. Escribir sobre ingeniería genética es, también, un reto, por tratarse de una metodología en continua renovación.

En "Ingeniería genética y transferencia génica", se recogen y desarrollan de forma amena y clara los métodos básicos y las aplicaciones. La autora tiene una larga experiencia docente e investigadora en este campo, que queda reflejada en la estructuración de los temas, en el lenguaje utilizado y en el ritmo de exposición. La obra constituye una edición revisada y ampliada de "Ingeniería genética", publicada en 1993.

aristotélico de sus predecesores, esforzándose por darle forma sistemática en los manuales universitarios que compusieron. A ese género literario, distintivo de los “lógicos de Oxford”, pertenece el texto de Venator, una inteligente reelaboración y reorganización de diferentes enfoques, tesis, argumentos y contraargumentos. Su *Logica* nos ha llegado a través de dos manuscritos (Vaticano y Pistoyense), que dan fe de la importancia de la tradición hispana e italiana en el conocimiento de la lógica inglesa de los siglos XIV y XV. Venator estaba familiarizado con las obras de Walter Burley, William Heytesbury, Richard Billingham, Richard Feribrigge y Henry Hopton. El tratado primero comprende, entre otros, los “términos”, la “consecuencia”, la “inferencia” y la “prueba”. A los universales, “suppositio” y contradicción dedica el segundo. Repasa en el tercero la verdad y falsedad de las proposiciones, así como las proposiciones modales. Para terminar en el cuarto con los condicionales, conectivas y negación.

El siguiente paso, salto para ser precisos, no se produjo hasta bien entrado el siglo XIX con otros lógicos ingleses, George Boole (1815-64) y Augustus de Morgan (1806-71), que desarrollaron la lógica algebraica. En cierto sentido, dieron cumplimiento al sueño de G. W. Leibniz (1646-1716), quien ya había subrayado la idea de un cálculo universal en el que pudieran traducirse los argumentos.

Pero hasta la obra de Gottlob Frege (1848-1925), autor del primer lenguaje matemático formal, no se logró el nivel de sistematización de la actual lógica formal. “Lo esencial de mi trabajo se halla en la *Ideografía*”, escribe en su propio diario, unos treinta años después de haberla publicado, en 1879, con el título *Begriffsschrift, eine des artihmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*.

En ese opúsculo, de una profunda originalidad y documento fundador de la lógica contemporánea, ofrece un nuevo lenguaje simbólico, con el que presenta su propio sistema de lógica. Matemático de formación, se proponía demostrar la reducción de la aritmética a la lógica. La presente traducción es la primera versión francesa del texto.

La *Ideografía*, cuya aparición apenas despertó entusiasmo, recibió en 1903 el reconocimiento merecido cuando Bertrand Russell expuso en *Principles of Mathematics* las nociones de Frege. Pero la *Ideografía* no es su última palabra sobre lógica. Antes bien, las ideas que allí presenta por vez primera las irá corrigiendo y modificando, cuando no abandonando, años más tarde.

¿Cuál es la relación entre lógica y matemática? La lógica es una ciencia que se aplica a todo, puesto que sus leyes son de validez universal; por ejemplo, el principio de tercio excluso: “Para cualquier objeto y cualquier propiedad, o bien el objeto posee la propiedad en cuestión o no la posee”. Ese principio vale para todas las disciplinas; en cambio, cada disciplina tiene sus propios objetos y sus propias leyes, exclusivas y diferentes, la química y la métrica, por ejemplo. Y lo predicado de la lógica puede decirse de la aritmética: $2 + 4 = 6$ expresa una verdad universal, que no se limita a las substancias naturales ni a los objetos corporales. La aritmética no sería más que una parte de la lógica. De una manera más precisa: es posible definir todos los términos de la aritmética por medio de términos puramente lógicos y es posible deducir todas las verdades aritméticas a partir de verdades lógicas. Someter a prueba esa hipótesis será el objetivo de su vida.

Una de las ramas más fecundas del programa lógico que empieza con Frege ha sido la metodología, que elevó a su máximo desarrollo Imre Lakatos (1922-1974) y rechazó con no menos destreza Paul Feyerabend (1924-1994). Los pros de uno y los contras de otro los ha recogido Matteo Motterlini en *For and Against Method. Including Lakatos’s Lectures on Scientific Method and the Lakatos-Feyerabend Correspondence*.

Todo empezó como un juego. “En 1970 Imre me arrinconó en una fiesta y me dijo: ‘Paul, tienes unas ideas muy raras. ¿Por qué no las escribes? Yo replicaré también por escrito y las publicaremos juntos. Nos reiremos de lo lindo’.” Así nació buena parte de *Against Method*, pero Lakatos murió antes de poder escribir la réplica, que ahora recuperamos en *For and Against Method* con la reconstrucción de sus contraargumentos originales a partir de las conferencias dadas por el húngaro sobre el método y las tesis feyerabendianas sobre el anarquismo. La tercera parte, la más larga, reúne la correspondencia inédita entre Lakatos

A	~A	A	B	A&B	AvB	A→B	A↔B
V	F	V	V	V	V	V	V
F	V	V	F	F	V	F	F
-	-	F	V	F	V	V	F
-	-	F	F	F	F	V	V

Tablas de verdad que definen formalmente los conectores lógicos

Cada capítulo se ha reestructurado, se han depurado los conceptos y el lenguaje. El libro se organiza en nueve capítulos, los cinco primeros dedicados a la metodología básica y los cuatro últimos a las técnicas de transferencia génica aplicada a distintos organismos. Dentro del primer bloque, el primer capítulo está dedicado a conceptos básicos de genética molecular. En los otros cuatro se recoge la metodología básica que, fundamentalmente, trata de las enzimas de restricción y sus aplicaciones, métodos de secuenciación, PCR, clonación, vectores, genotecas y mutagénesis. En el bloque de transferencia génica, son de destacar los capítulos dedicados a la transferencia a organismos completos y en plantas.

La autora selecciona los temas principales dándoles la dimensión adecuada. Por ejemplo, la PCR, que apenas se desarrollaba en la primera edición, constituye, en esta, un capítulo completo. Sin embargo, hay cuestiones que no le merecen rango de capítulos específicos, por ejemplo, la hibridación molecular. Desde un punto de vista formal, la inclusión de un índice analítico supone una ayuda importante para el lector. En el apartado sobre la clonación en mamíferos plantea el debate sobre clonación humana.

ROSA DE FRUTOS

y Feyerabend sobre ciencia, filosofía y varios entre 1968 y 1994.

Defiende Lakatos que la posibilidad de que nuestras valoraciones quedaran en el futuro contradichas no constituye razón para no confiar en ellas ahora. Aun cuando el futuro sea impredecible, los programas escogidos no son todos iguales. La unidad de valoración del progreso del conocimiento es una serie de teorías en la que cada una se obtiene mediante la adición de cláusulas auxiliares a fin de dar acomodo a anomalías y producir nuevas predicciones. Objeta Feyerabend: “Si las revoluciones científicas ponen en cuestión todas las ideas nacidas

Transportes y Comunicaciones

INSTITUTIONS IN THE TRANSPORT AND COMMUNICATIONS INDUSTRIES. STATE AND PRIVATE ACTORS IN THE MAKING OF INSTITUTIONAL PATTERNS, 1850-1990. Dirigido por Lena Anderson-Skog y Olle Krantz. Science History Publications/USA, 1999.

Se reúnen en este volumen algunos de los trabajos presentados en el congreso que, bajo el título de *Las instituciones y los cambios institucionales en las industrias del transporte y las comunicaciones durante los siglos XIX y XX*, se celebró en abril de 1996 en la Universidad de Umea. Se propone ofrecer los nuevos planteamientos con los que abordar la historia del transporte y las comunicaciones, como parte de las investigaciones en el campo de la historia económica, y una visión del estado actual de esas investigaciones.

La historia del transporte estuvo al principio incardinada en el estudio empírico de la relación entre modalidades del transporte y su rendimiento económico. Desde los años ochenta se opta por una perspectiva más teórica. Se explicitan los casos de intervención del estado en el proceso de industrialización fomentando la construcción de canales, carreteras y ferrocarriles; en otras ocasiones predominó la iniciativa privada y el estado cumplía el papel de valedor de instituciones y también de entidad crediticia. Pero siempre fue necesario tomar decisiones políticas.

Las colaboraciones se centran unas en el desarrollo legislativo y otras en el tránsito de un modelo institucional a otro. Unas atienden a los aspectos económicos y otras intentan aclarar la interacción entre procesos políticos y económicos. No son éstos los únicos planteamientos básicos de los trabajos que conforman las tres partes esenciales del libro.

En la primera (“Los actores y los modelos institucionales en una comparativa internacional”) se investiga la complejidad sociopolítica en que nacieron los sistemas de transportes modernos en diversos países. Entre los trabajos, uno comparativo sobre la evolución del transporte aéreo en EE.UU. y Europa. Una característica común a los textos de esta parte del libro es que se recalca la influencia de los trasfondos sociales y sistemas políticos. Pasa así a primer plano el concepto de cultura y su papel en la historia económica.

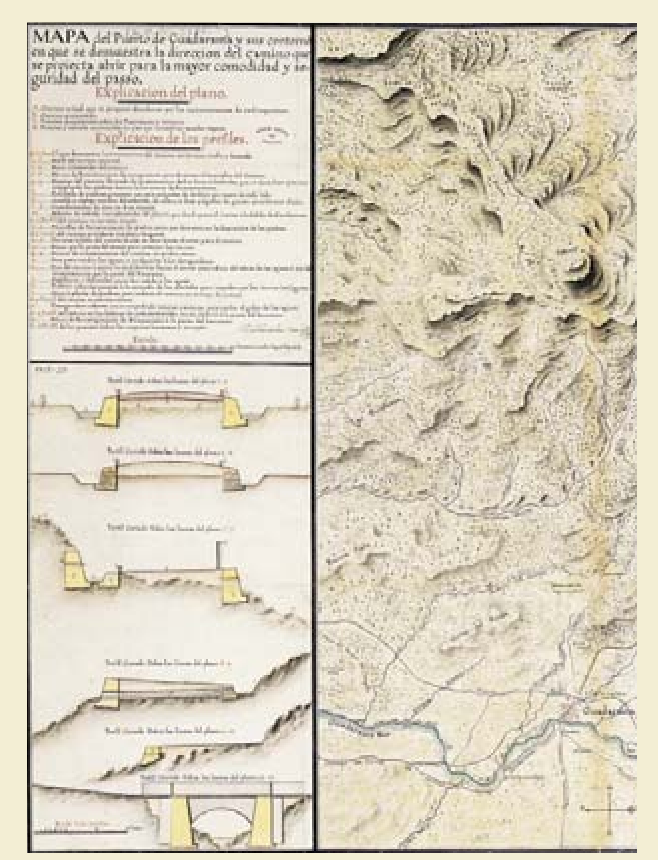
En la segunda parte (“Leyes del mercado y de los transportes en Europa”) se estudian los cambios a largo plazo en los mercados y las legislaciones en varios países europeos. Se analizan la legislación ferroviaria y la nacionalización de los trenes británicos en sendos trabajos y, en un tercero, la intervención del estado en las compañías de navegación. Otra ponencia recorre la navegación fluvial en Alemania durante la industrialización del siglo XIX. Antonio Gómez Mendoza, profesor de historia económica en la Universidad Complutense, nos acerca a la situación de los transportes terrestres en España en el período de entreguerras.

La tercera parte constituye una monografía sobre “El caso sueco”. Con una superficie de las mayores del continente, y con unas regiones septentrionales poco pobladas pero asiento de importantes materias primas, la industrialización de Suecia corrió pareja a la construcción de las redes nacionales de transportes y comunicaciones, en la cual el estado fue un actor destacado. Pero no agente único. La complejidad del sistema político, y sus instituciones, permitió que distintos grupos pudieran hacer uso de la legislación e influir a la vez, con sentido de la oportunidad, en la toma de decisiones.

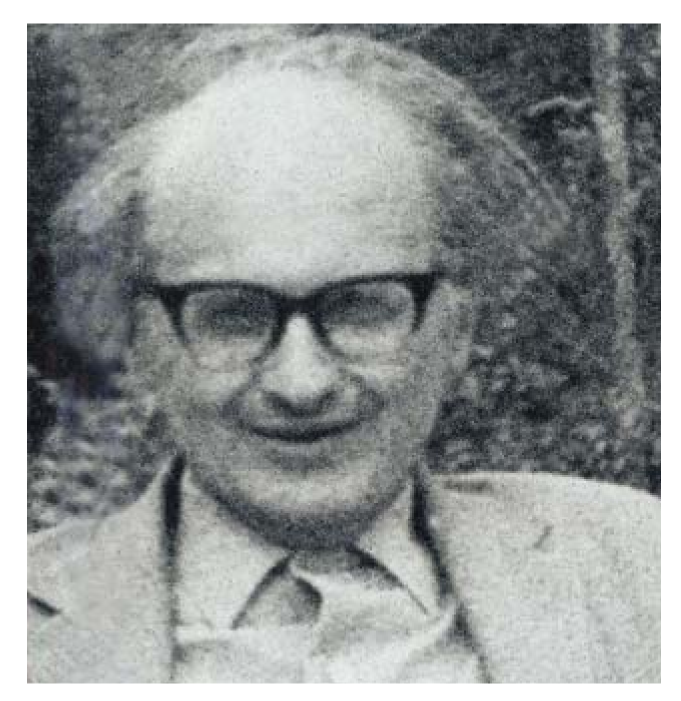
Termina el libro con una cuarta parte, a modo de nota final, que busca encauzar el rumbo futuro de las investigaciones. Se denuncia la falta de trabajos de historia de las comunicaciones y se proclama la necesidad de investigaciones comparativas.

Todos los trabajos están acompañados de notas de referencia y consulta, como suele ser habitual en este tipo de obras, que hacen de ésta una buena fuente informativa para los estudiosos.

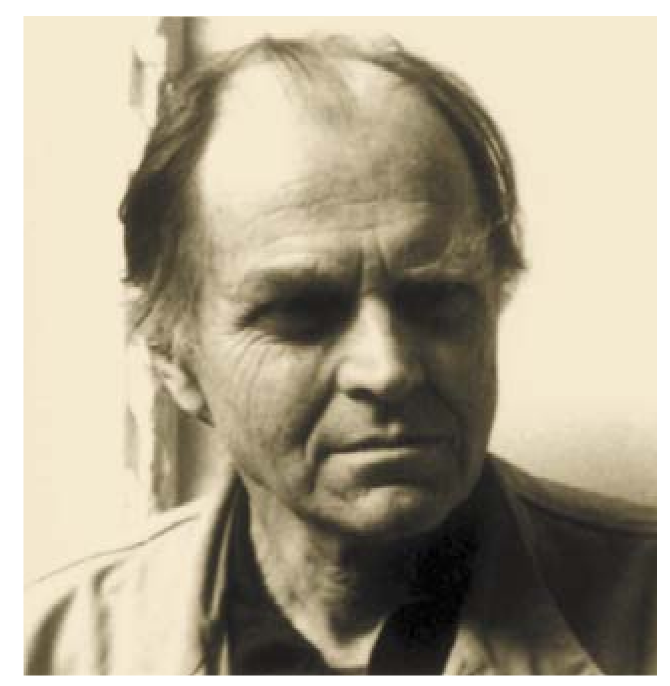
J. VILARDELL



Mapa del Puerto de Guadarrama. Francisco Nangle, 1749. Archivo General de Simancas



Imre Lakatos (1922-1974)



Paul Feyerabend (1924-1994)

en conexión con los procedimientos empleados, juicios básicos de valor incluidos, ¿cómo podemos decidir rechazar los postulados de la filosofía aristotélica con sus juicios de valor para sustituirlos por postulados y juicios de valor de la ciencia de Galileo o Newton?" Replica Lakatos: "Sobre la base de una reconstrucción racional." Insiste Feyerabend: "Sobre la base de una reconstrucción racional ¿de qué?" Lakatos: "Sobre la base de una reconstrucción racional de la ciencia moderna." Y Feyerabend: "Pero eso es dar por supuesto lo que todavía tiene que demostrarse: la supremacía metodológica de la ciencia moderna. Y así está condenando el aristotelismo desde nuestro punto de vista, sin mostrar que el nuestro es mejor que el suyo." Lakatos: "Su postura es una visión colorista del escepticismo de Pirrón." En el fondo, el quid del asunto radicaba en el problema de la demarcación, en qué es lo que distingue a la ciencia de la pseudociencia. Con menos radicalidad se trata de la valoración de las teorías científicas para mostrar cuándo una teoría es mejor que otra. Lakatos, antes de alejarse de Popper, repasa las ideas motrices de tres escuelas principales: positivismo militante, escepticismo (anarquismo epistemológico o relativismo cultural) y autoritarismo elitista.

Para el positivismo militante, una vez definido el criterio de demarcación, habría teorías buenas y malas. Una lista progresiva de las primeras incluiría la teoría de Copérnico, Galileo, Kepler, Newton y Einstein. Para el escepticismo, anarquismo epistemológico y relativismo cultural, sinónimos de la línea de pensamiento que se retrotrae hasta Pirrón y tiene su principal defensor en Feyerabend, el problema de la demarcación se torna insoluble, por una razón muy sencilla: no existe línea de demarcación; epistemológicamente hablando, todas las teorías son iguales. Lo único que hay son modas cambiantes. Feyerabend prefiere decir que todo vale. Por fin, para el autoritarismo elitista, corriente encabezada por Polanyi, Kuhn y Merton, habría demarcación, aunque no criterios de demarcación. ¿Por qué? Porque la diferencia entre ciencia y pseudociencia es inarticulable. Sólo un científico preeminente es capaz de discriminar una de otra: tenemos un jurado pero carecemos de una ley.

Según Popper, para que una teoría sea científica tiene que tener potenciales falsadores. Ello significa que podemos especificar un experimento que la contradiga, lo que exige decidir qué aceptar por proposición experimental. Las reglas de Popper dictan primero que la hipótesis sea consistente; segundo, siempre que planteemos una teoría, tenemos que presentar sus falsadores potenciales; tercero, una vez rechazada la teoría por un contraejemplo, hemos de especificar una nueva teoría que cumpla determinadas condiciones. La racionalidad de la empresa científica se funda en la separación de las proposiciones en dos: enunciados básicos y enunciados teóricos; enunciados falsables y enunciados no falsables ("metafísicos").

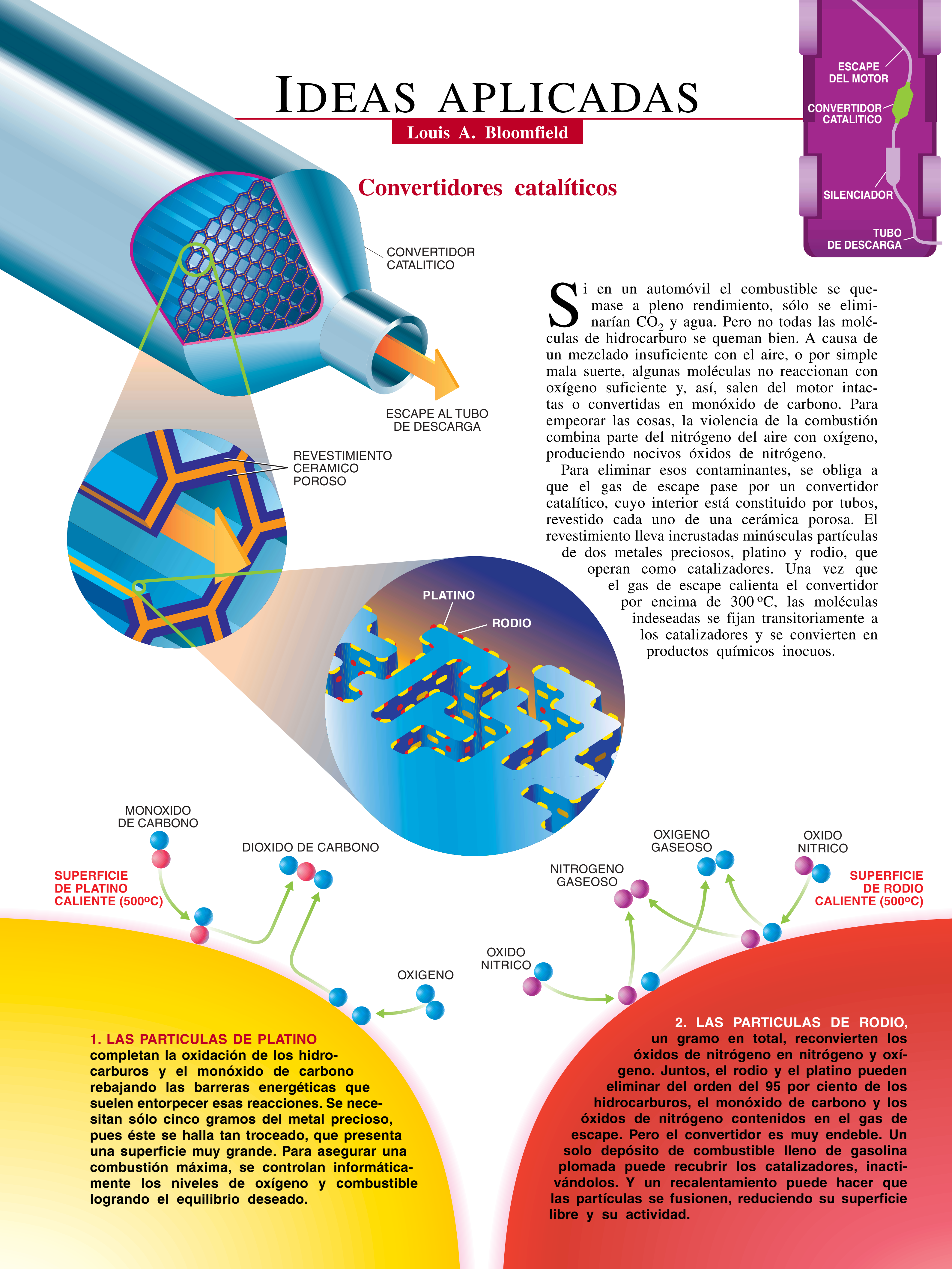
Lakatos pone de manifiesto que el problema del falsacionismo es que, viendo en la historia qué ha sucedido con la ciencia, todo estaría viciado. Porque todas las teorías han nacido con anomalías. Pero, contrariamente a lo que exige Popper, esas anomalías han quedado almacenadas, no rechazadas. Lakatos llamó metodología de los programas de investigación científica a su propuesta. Si consideramos la historia de la ciencia, resulta que lo que valoramos no es una extensa conjunción sincrónica de hipótesis H1, H2,... Hn (con Hn = 17, por ejemplo), cualquiera de las cuales podríamos cambiar. Normalmente nos hallamos ante un *núcleo duro*, formado por dos, tres, cuatro o como máximo cinco postulados. En el caso de la teoría de Newton su núcleo duro consta de tres leyes de la dinámica más una cuarta de gravitación. Junto con el núcleo, tenemos hipótesis auxiliares, un *cinturón de protección*. Cuando ocurre alguna objeción o contraejemplo, en vez de refutar el núcleo duro, los dardos van contra las hipótesis auxiliares. La resistencia del núcleo como unidad de valoración resulta más interesante que decidir si una teoría dada es o no falsable.

LUIS ALONSO

IDEAS APLICADAS

Louis A. Bloomfield

Convertidores catalíticos



Si en un automóvil el combustible se quemase a pleno rendimiento, sólo se eliminarían CO_2 y agua. Pero no todas las moléculas de hidrocarburo se queman bien. A causa de un mezclado insuficiente con el aire, o por simple mala suerte, algunas moléculas no reaccionan con oxígeno suficiente y, así, salen del motor intactas o convertidas en monóxido de carbono. Para empeorar las cosas, la violencia de la combustión combina parte del nitrógeno del aire con oxígeno, produciendo nocivos óxidos de nitrógeno.

Para eliminar esos contaminantes, se obliga a que el gas de escape pase por un convertidor catalítico, cuyo interior está constituido por tubos, revestido cada uno de una cerámica porosa. El revestimiento lleva incrustadas minúsculas partículas de dos metales preciosos, platino y rodio, que operan como catalizadores. Una vez que el gas de escape calienta el convertidor por encima de 300 ºC, las moléculas indeseadas se fijan transitoriamente a los catalizadores y se convierten en productos químicos inocuos.

1. LAS PARTICULAS DE PLATINO completan la oxidación de los hidrocarburos y el monóxido de carbono rebajando las barreras energéticas que suelen entorpecer esas reacciones. Se necesitan sólo cinco gramos del metal precioso, pues éste se halla tan troceado, que presenta una superficie muy grande. Para asegurar una combustión máxima, se controlan informáticamente los niveles de oxígeno y combustible logrando el equilibrio deseado.

2. LAS PARTICULAS DE RODIO, un gramo en total, reconvierten los óxidos de nitrógeno en nitrógeno y oxígeno. Juntos, el rodio y el platino pueden eliminar del orden del 95 por ciento de los hidrocarburos, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno contenidos en el gas de escape. Pero el convertidor es muy endeble. Un solo depósito de combustible lleno de gasolina plomada puede recubrir los catalizadores, inactivándolos. Y un recalentamiento puede hacer que las partículas se fusionen, reduciendo su superficie libre y su actividad.